

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE ESTUDIO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Sistema automatizado del método FAO Penman para el control de riego del frijol
canario según las condiciones climáticas de Trujillo

Línea de investigación: Robótica y automatización avanzada

Autor:

Fernández Arce, Daniel Esteban

Jurado evaluador:

Presidente : De La Cruz Rodríguez, Oscar Miguel

Secretario : León Cerna, Alejandro Martín

Vocal : Alvarado Rodríguez, Luis Enrique

Asesor:

Azabache Fernández, Filiberto Melchor

Código Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2833-0493>

Trujillo–Perú

2023

Fecha de Sustentación: 2023/04/03

“SISTEMA AUTOMATIZADO DEL MÉTODO FAO PENMAN PARA EL CONTROL DE RIEGO DEL FRIJOL CANARIO SEGÚN LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS DE TRUJILLO”

AUTOR:

Br. Fernández Arce, Daniel Esteban

APROBADO POR:



Ms. Oscar Miguel de la Cruz Rodríguez
PRESIDENTE
N° CIP:85598



Ms. Alejandro Martín León Cerna
SECRETARIO
N° CIP:177967



Ms. Luis Enrique Alvarado Rodríguez
VOCAL
N° CIP:149200



Ms. Filiberto Melchor Azabache Fernández
ASESOR
N° CIP:97916

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE ESTUDIO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Sistema automatizado del método FAO Penman para el control de riego del frijol
canario según las condiciones climáticas de Trujillo

Línea de investigación: Robótica y automatización avanzada

Autor:

Fernández Arce, Daniel Esteban

Jurado evaluador:

Presidente : De La Cruz Rodríguez, Oscar Miguel

Secretario : León Cerna, Alejandro Martín

Vocal : Alvarado Rodríguez, Luis Enrique

Asesor:

Azabache Fernández, Filiberto Melchor

Código Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2833-0493>

Trujillo–Perú

2023

Fecha de Sustentación: 2023/04/03

Dedicatoria

Esta tesis se la dedico a Dios por siempre guiarme por el buen camino y bendecir mis pasos para poder llegar a cumplir unas de mis metas sin rendirme en los intentos.

A mis padres por siempre estar a mi lado con buenos consejos, comprensión y sobre todo por brindarme los recursos necesarios para poder estudiar. Me han brindado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios y mi valentía para conseguir mis objetivos.

A mi enamorada por siempre estar conmigo apoyándome cuando pensaba que me iba a rendir me alentó y me apoyo para continuar.

A mis compañeros por apoyarme moralmente en mi carrera universitaria.

Atte. Daniel Esteban Fernández Arce

Resumen

Las necesidades que tienen los agricultores de frijol canario en la ciudad de Trujillo con relación al manejo del agua y crecimiento del frijol motivaron el desarrollo del presente proyecto.

El objetivo del presente trabajo fue diseñar sistema automatizado basado en el método FAO PENMAN para controlar la proporción de agua que se suministra al riego del frijol canario según las condiciones climáticas en un ambiente simulado de la ciudad de Trujillo. Se trabajó sobre una muestra de las condiciones climáticas durante 5 meses, obteniendo datos importantes para comparar los rendimientos del método de riego Fao Penman con respecto al método tradicional.

Los resultados de la investigación determinaron que el mejor mes para iniciar el cultivo del frijol canario es marzo, debido a que es el mes de mayor precipitación de agua, y que se vio reflejado en el volumen total de agua que debe ser suministrada, presentando el valor de volumen más bajo en comparación a otros meses.

Palabras clave:

Riego automatizado, Prototipo, Método, FAO PENMAN, Riego Convencional, Ambiente Simulado.

Abstract

The needs of Canarian bean farmers in the city of Trujillo in relation to water management and bean growth motivated the development of this project.

The objective of this work was to design an automated system based on the FAO PENMAN method to control the proportion of water supplied to the irrigation of Canarian beans according to climatic conditions in a simulated environment in the city of Trujillo. Work was done on a sample of climatic conditions for 5 months, obtaining important data to compare the yields of the Fao Penman irrigation method with respect to the traditional method.

The results of the investigation determined that the best month to start the cultivation of canary beans is March, because it is the month with the highest rainfall, and that was reflected in the total volume of water that must be supplied, presenting the lower volume value compared to other months.

Keywords:

Automated irrigation, Prototype, Method, FAO PENMAN, Conventional Irrigation, Simulated Environment.

Presentación

Señores miembros del Jurado:

De conformidad con lo estipulado en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Privada Antenor Orrego, pongo a su disposición el informe de tesis titulado “Sistema automatizado del método FAO Penman para el control de riego del frijol canario según las condiciones climáticas de Trujillo” para que sea revisado y evaluado y de ser aprobado pueda ser defendido oralmente para optar el título profesional de Ingeniero Electrónico.

De antemano, me excuso de los errores involuntarios en que hubiera incurrido en el desarrollo y redacción del misma, esperando del honorable jurado un justo dictamen.

Daniel Esteban Fernández Arce

Tabla de contenidos

Dedicatoria	iv
Resumen	v
Abstract	vi
Presentación.....	vii
Tabla de contenidos	viii
Índice de tablas.....	xi
Índice de figuras	xii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Problema de Investigación.....	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Justificación del estudio.....	2
II. MARCO DE REFERENCIA	3
2.1. Antecedentes del estudio	3
2.2. Marco teórico.....	4
2.2.1. Frijol Canario	4
2.2.1.1. Proceso del crecimiento del frijol canario	4
2.2.1.2. Características del frijol canario	5
2.2.1.3. Requerimientos del suelo.....	5
2.2.1.4. Tipo de riego.....	5
2.2.2. Metodología FAO Penman – Monteith.....	6
2.2.3. Variables climatológicas	6
2.2.3.1. Temperatura.....	6
2.2.3.2. Humedad.....	6
2.2.3.3. Velocidad del viento	7
2.2.3.4. Precipitación	7

2.2.3.5.	Radiación solar	7
2.2.4.	Monitoreo de variables climatológicas	7
2.2.4.1.	Sistema automatizado	7
2.2.4.2.	Sensor de temperatura	8
2.2.4.3.	Sensor de humedad.....	8
2.2.4.4.	Sensor de velocidad del viento	8
2.2.4.5.	Sensor de precipitación	9
2.2.4.6.	Sensor de radiación solar.....	9
2.3.	Marco Conceptual	9
2.3.1.	Proporción de agua suministrada en el riego del frijol canario.....	9
2.3.2.	Condiciones climáticas	10
III.	METODOLOGÍA EMPLEADA	11
3.1.	Tipo y nivel de investigación.....	11
3.1.1.	Tipo y nivel de investigación.....	11
3.1.1.1.	Tipo de investigación	11
3.1.1.2.	Nivel de investigación	11
3.2.	Población y muestra de estudio	11
3.3.	Diseño de investigación.....	11
3.4.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	12
3.4.1.	Guía de análisis de documentos de datos históricos de condiciones climáticas en la ciudad de Trujillo.....	12
3.4.2.	Equipo de medición implementado en el simulador	17
3.5.	Procesamiento y análisis de datos	29
3.5.1.	Tabla de niveles de condiciones climáticas en la ciudad de Trujillo durante 5 meses	29
3.5.2.	Curva de proporción de agua suministrada al frijol canario durante 5 meses	31
3.5.3.	Variabilidad de la curva de proporción de agua suministrada al frijol canario con respecto a los valores teóricos	32

3.5.4.	Relación de condiciones climáticas con respecto a la productividad del frijol canario	33
3.5.5.	Estimación del rendimiento del sistema automatizado mediante simulación	34
IV.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	39
4.1.	Resultados	39
4.1.1.	Condiciones climáticas de la ciudad de Trujillo.	39
4.1.2.	Parámetros de evapotranspiración establecidos por el método FAO Penman...	40
4.1.3.	Propuesta de la arquitectura del sistema automatizado	41
4.1.4.	Estimación Rendimiento del diseño propuesto	51
4.2.	Docimasia de hipótesis	51
V.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	52
	CONCLUSIONES	53
	RECOMENDACIONES	54
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
	ANEXOS	57
	Anexo 1: Factor de cultivo (Kc)	57
	Anexo 2: Tabla del factor de evapotranspiración potencial	58
	Anexo 3: Ambiente simulado de la ciudad de Trujillo	59

Índice de tablas

Tabla 1: Operacionalización de variables.....	10
Tabla 2: Diseño de estudio.	11
Tabla 3: Técnicas e instrumentos de recolección de datos	12
Tabla 4: Tabla de la radiación solar, velocidad del viento y precipitación.....	16
Tabla 5: Cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET _o).	18
Tabla 6: Duración aproximada de las etapas en el periodo vegetativo y Coeficiente del cultivo (K _c) de frijol canario (<i>Phaseolus vulgaris</i> L).	19
Tabla 7: Cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET _c).	19
Tabla 8: Índice de contenido de humedad del suelo.	21
Tabla 9: Eficiencia según el tipo de riego.....	22
Tabla 10: Caudal de emisores calibrados para tratamiento.....	23
Tabla 11: Tabla de frecuencia de riego al frijol canario durante 5 meses consecutivos....	25
Tabla 12: Tabla de días de riego al frijol canario durante 5 meses consecutivos.	26
Tabla 13: Tabla de horas de riego al frijol canario durante 5 meses consecutivos.	27
Tabla 14: Tabla de volumen de riego al frijol canario durante 5 meses consecutivos.....	28
Tabla 15: Tabla de proporción de agua suministra al frijol canario durante 5 meses consecutivos.	28
Tabla 16: Niveles de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y precipitación en la ciudad de Trujillo durante 5 meses consecutivos.	30
Tabla 17: Tabla de variabilidad de proporción de agua que requiere el cultivo de frijol canario.....	33
Tabla 18: Tabla de relación de condiciones climáticas y la proporción de agua requerida en el riego de frijol canario.	34
Tabla 19: Volumen de agua suministrada según el mes de inicio del cultivo de frijol canario.....	38
Tabla 20: Condiciones climáticas de la ciudad de Trujillo.	39
Tabla 21: Parámetros de evapotranspiración establecidos por el método FAO Penman.	40
Tabla 22: Volumen total de agua suministrada durante 5 meses consecutivos iniciando en cada mes del año.	51

Índice de figuras

Figura 1: Datos Hidrometeorológicos en la ciudad de Trujillo.....	13
Figura 2: Datos Hidrometeorológicos en la ciudad de Trujillo a través de los años.	13
Figura 3: Temperatura y humedad relativa en la ciudad de Trujillo durante todo el año...14	
Figura 4: Mapa y cuadro del visor de acceso de datos	14
Figura 5: Cuadro del visor de acceso de datos	15
Figura 6: Parámetros del visor de acceso de datos	15
Figura 7: Datos extraídos en formato .csv cargados a Excel.....	16
Figura 8: Gráfico de la curva de proporción de agua suministrada al frijol canario en la ciudad de Trujillo.....	31
Figura 9: Gráfico de la variabilidad de la curva de proporción de agua suministrada al frijol canario con respecto a los valores teóricos en la ciudad de Trujillo	32
Figura 10: Simulación del sistema automatizado durante los meses de marzo, abril, mayo, junio y julio.....	35
Figura 11: Simulación del sistema automatizado durante los meses de enero, febrero, marzo, abril y mayo	35
Figura 12: Simulación del sistema automatizado durante los meses de mayo, junio, julio, agosto y setiembre	36
Figura 13: Simulación del sistema automatizado durante los meses de julio, agosto, setiembre, octubre y noviembre	36
Figura 14: Simulación del sistema automatizado durante los meses de setiembre, octubre, noviembre, diciembre y enero	37
Figura 15: Diagrama de bloques del sistema de riego.	41
Figura 16: Diagrama de flujo del sistema de riego automatizado.	42
Figura 17: Electrobomba Centrifuga Pedrollo COM 1HP 620.....	43
Figura 18: Tanque de agua de 1200 litros.....	44
Figura 19: Tubería de polietileno de 32mm.....	44
Figura 20: Conector inicial.	45
Figura 21: Tubería de polietileno de 16mm.....	45
Figura 22: Gotero auto compensable RIEGOPRO.	45
Figura 23: Válvula de unión de 16mm.....	46
Figura 24: Tapón de presión de 16mm.	46
Figura 25: Toma hembra de ½ pulgada.	47
Figura 26: Electroválvula normalmente cerrada de 220 V.	47
Figura 27: Sensor DHT11.	48
Figura 28: Sensor ML8511.....	48

Figura 29: Sensor YL-83.....	49
Figura 30: Anemômetro JL-FS2.....	50
Figura 31: Microcontrolador Arduino 2560.	50

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Problema de Investigación

El frijol canario es una nueva variedad de buen potencial de rendimiento que es altamente resistente a estas dos enfermedades. Es de porte arbustivo y de mayor adaptación que las variedades comerciales similares. Su grano es de tamaño grande, de buena calidad comercial, fácil cocción y excelente sabor. Este frijol crece en condiciones de costa subtropical y valles interandinos, a temperatura moderada. Requiere de riegos ligeros de 3 a 5, en intervalos de 20 días aproximadamente. La producción de frijol en el Perú ocupa un territorio de 82 475 hectáreas, con una producción de 98300 toneladas; y un rendimiento promedio de 1,2 t/ha.

El cultivo del frijol se realiza con el método de monocultivo, sembrando en surcos a 0.70-0.80 m entre sí, o también se puede hacer en hileras pares de 0.40m entre ellas y 0.8m entre pares de estas. Se siembran en promedio de 15 a 20 semillas por metro líneas en la siembra mecanizada, y por el método manual, 3 semillas por golpe cada 20 cm. El frijol canario presenta varios problemas en su producción, como pueden ser problemas con el suelo, problemas de fertilidad, problemas físicos de erosión y compactación, problemas por desorden nutricionales, problemas bióticos, genéticos y climáticos.

La investigación es aplicada, de tipo no experimental: correlacional, se desarrollará en un ambiente simulado de la ciudad de Trujillo, durante 4 meses. Los hechos problemáticos principales en la investigación son problemas graves de pudrición y problemas por sequedad en la producción. Estos dos principales problemas se dan por riegos excesivos en los primeros meses de cultivo y la falta de riego en los meses de mayor necesidad hídrica (Pastor-Corrales & F. Schwartz, 1994).

El problema se define en controlar la proporción de agua que se suministra al riego del frijol canario según las condiciones climáticas en un ambiente simulado de la ciudad de Trujillo.

El problema de investigación se formula de la siguiente manera:

¿Como controlar la proporción de agua que se suministra al riego del frijol canario según las condiciones climáticas en un ambiente simulado de la ciudad de Trujillo?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Diseñar un sistema automatizado basado en el método FAO Penman para controlar la proporción de agua que se suministra al riego del frijol canario según las condiciones climáticas en un ambiente simulado de la ciudad de Trujillo.

1.2.2. Objetivos específicos

- Identificar las condiciones climáticas de la ciudad de Trujillo.
- Calcular los parámetros de evapotranspiración establecidos por el método FAO Penman.
- Proponer la arquitectura del sistema automatizado.
- Estimar el rendimiento del diseño propuesto.

1.3. Justificación del estudio

La investigación se justifica por su implicancia practica por que propone el diseño de un sistema que controla la proporción de agua que se suministra al riego del frijol según la condición climática.

La investigación se justifica por su valor teórico porque fortalece la teoría de la evapotranspiración FAO Penman en los cultivos, en especial en el riego del frijol canario.

II. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Antecedentes del estudio

En la investigación de Bustos (2019) titulada: “Diseño y control domótico de un sistema de riego automático para un huerto urbano en el hogar”, realizó el diseño de un sistema de riego automático para controlar y monitorear el crecimiento de las semillas de unas plantas en un huerto urbano en el hogar. Tras analizar la metodología de las pruebas realizadas, estableció parámetros de humedad, luminancia, temperatura, etc. El principal aporte en este trabajo es la comprobación de parámetros para determinar el crecimiento de plantas en un huerto urbano en el hogar, que serán empleados en la investigación para la contratación de los resultados obtenidos.

En el proyecto final de grado de Escalas (2015) titulado: “Diseño y desarrollo de un prototipo de riego automático controlado con Raspberry PI y Arduino”, brindo un gran aporte técnico para la conectividad de los sensores y el uso de un raspberry para monitorear y controlar el flujo de agua, donde crearon un código que no genera muchos recursos al proceso, y a la vez, la conexión del Arduino con él raspberry por medio de cable serial, dando como resultado que un usuario específico pueda controlar que quiera recibir y a la vez en momento que se desea.

En el trabajo de titulación de Salinas (2018) titulado: “Diseño de un prototipo de sistema automatizado con Arduino para riego en el cultivo de fresas”, diseñó un prototipo de riego automatizado para un cultivo de fresas, que permite la lectura parámetros como humedad de suelo y temperatura ambiente y así ejecutar riego dependiendo del estado de estos, agregando un servidor local para visualizar los registros. En esta investigación se llega a comprobar la medición de dichos parámetros es factible y eficaz, además de obtener registros, que serán empleados en la investigación para la obtención de datos.

En el trabajo de grado de Cañón & Cifuentes (2018) titulado: “Prototipo de un sistema automatizado de riego para jardines” creó un prototipo de capaz de activar su función de riego mediante los parámetros de humedad y temperatura, donde los datos adquiridos son guardados en una base de datos.

En el trabajo de grado de Gamba (2015) titulado: “Sistema automático remoto para el cuidado de cultivos cereales (frijol y arveja)” diseño un sistema de riego de fungicidas e insecticidas, funciono mejor de lo esperado, permitiendo un riego controlado sobre las plantas y reduciendo el contacto del cultivador con los químicos.

En el trabajo de grado de Edison (2015) titulado: “Prototipo de control de un cultivo de tomate Cherry en in invernadero” se diseñó un prototipo para el control automático de la temperatura, humedad y luminosidad en cultivos que se pueda activar por medio de sensores y de una aplicación para Android Os de manera remota.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Frijol Canario

2.2.1.1. Proceso del crecimiento del frijol canario

El frijol de grano seco (*Phaseolus vulgaris* L.) o más conocido como frijol, cuyo periodo vegetativo tiende entre 7 meses según su variedad.

Según (MINAGRI, 2019) la ficha técnica del ministerio de Agricultura y riego llamado “Requerimientos Agroclimáticos del cultivo de frijol grano seco” el frijol crece en tres periodos:

- Crecimiento vegetativo
- Crecimiento reproductivo

- Maduración

2.2.1.2. Características del frijol canario

El frijol canario consta con un alto contenido en fibra y proteínas, por ende, es una gran fuente de minerales. Este tipo de frijol se le puede identificar por tener una apariencia alargada o redondeada, con cascara limpia, de color piel y pulpa de morado intenso; consta una textura de carnosidad firme y fresca, ligeramente dulces. Sus zonas de producción más comunes son en la ciudad Ica y pueden ser producidas todo el año (Agromania, 2019).

2.2.1.3. Requerimientos del suelo

Según la ficha técnica de él ministerio de Agricultura y riego llamado “Requerimientos Agroclimáticos del cultivo de frijol grano seco” nos habla que el frejol se puede adaptar a distintos tipos de suelo, como en textura moderadamente gruesa (franco arenoso), media (franco, franco limoso) y moderadamente fino (franco arcilloso). El suelo óptimo para su crecimiento es el suelo de textura franca, con buen material de materia orgánica (MINAGRI, 2019).

2.2.1.4. Tipo de riego

Según la ficha técnica del Instituto Nacional de Investigación Agraria llamado “El cultivo del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en la costa del Perú” nos indica que el frejol debe tener un riego ligero, de 3 a 5 riegos en intervalos de 20 días aproximadamente, por lo cual el sistema ideal es el de riego localizado, específicamente el riego por goteo (Valladolid, 2019).

2.2.2. Metodología FAO Penman – Monteith

La metodología FAO Penman-Monteith de evaluación de daños y pérdidas nos proporciona una serie de pasos de procedimiento y computación para calcular los daños y pérdidas provocadas por los desastres en los sectores agrícolas. Este método nos permite calcular de manera eficaz el suministro de agua en un cultivo (FAO, 2006).

2.2.3. Variables climatológicas

2.2.3.1. Temperatura

Según la ficha técnica de él ministerio de Agricultura y riego llamado “Requerimientos Agroclimáticos del cultivo de frijol grano seco” nos habla que el frijol tiene una temperatura optima de 15° a 20°-25° grados centígrados y una temperatura critica de 8°-12° a 25° grados centígrados (MINAGRI, 2019).

2.2.3.2. Humedad

Según la ficha técnica de él ministerio de Agricultura y riego llamado “Requerimientos Agroclimáticos del cultivo de frijol grano seco” su humedad optima debe ser de entre 50% y 70%, con un déficit hídrico sensible hasta el periodo de crecimiento reproductivo, ya empezando en periodo de maduración el déficit hídrico cambia a tolerante (MINAGRI, 2019).

2.2.3.3. Velocidad del viento

Según la ficha técnica de él ministerio de Agricultura y riego llamado “Requerimientos Agroclimáticos del cultivo de frijol grano seco” nos indica que, la velocidad del viento óptima para un crecimiento productivo, debe ser una velocidad de viento dominante menor a 11.5 km/h (MINAGRI, 2019).

2.2.3.4. Precipitación

Según la ficha técnica de él ministerio de Agricultura y riego llamado “Requerimientos Agroclimáticos del cultivo de frijol grano seco” nos indica que la precipitación pluvial optima en el crecimiento del cultivo del frijol de grano seco se encuentra alrededor de 400 mm a 600 mm, siendo el contenido de este proveniente de las lluvias, que debe ser correctamente distribuida en las diferentes fases del periodo vegetativo (MINAGRI, 2019).

2.2.3.5. Radiación solar

En su trabajo “Producción de frijol, en dos épocas de siembra: su relación con la evapotranspiración, unidades de calor y radiación solar en el clima cálido” señala que la radiación solar acumulada durante el desarrollo del cultivo también es determinante en la producción de este (Escalante, 2001).

2.2.4. Monitoreo de variables climatológicas

2.2.4.1. Sistema automatizado

Un sistema automatizado es aquel sistema al que se le entregan tareas de productividad, y lo realiza usando elementos tecnológicos que nos

manipular el proceso y monitorear su proceso a través de un computador. Actualmente, para llevar a cabo la automatización de un sistema, se tienen diversos medios, entre ellos, los más usados son los controladores lógico-programables (Bustamante, 2016)(PLC), que se encuentra en el mercado en distintos modelos y marcas (Bustamante, 2016).

2.2.4.2. Sensor de temperatura

Los sensores de temperatura se utilizan para medir el calor en un proceso u cumplimiento de una condición, lo que asegurara la seguridad en estos. Hay dos variedades principales: sensores de temperatura con contacto y sin contacto. Los sensores de contacto incluyen termopares y termistores que hacen contacto con el objeto a medir, y los sensores sin contacto se encarga de medir la radiación térmica emitida por una fuente de calor para determinar su temperatura.

2.2.4.3. Sensor de humedad

Los sensores de humedad se utilizan para medir la humedad relativa en un área dada, se puede usar tanto en interiores como exteriores. Están disponibles en formas analógicas como digitales. Los sensores digitales de humedad funcionan a través de dos microsensores que se calibran a la humedad relativa de la zona dada. Estos luego se convierten a formato digital a través de un proceso de conversión analógico a digital, realizado por un chip en el mismo circuito.

2.2.4.4. Sensor de velocidad del viento

Estos sensores se encargan de medir la velocidad instantánea del viento. Este sensor está formado por una esfera hueca y ligera, cuya

posición respecto a un punto de suspensión varía según la fuerza del viento, la cual se mide en un cuadrante. Estos sensores miden la velocidad del viento durante intervalos de tiempo, y usando el valor medio de estos, debido a que las ráfagas de viento desvirtúan las medidas.

2.2.4.5. Sensor de precipitación

Estos sensores se encargan de tomar datos sobre la precipitación que cae en la superficie terrestre en sus diferentes formas, tales como lluvia, granizo u nieve. Este sensor conta de un tambor que rota a una velocidad constante, este tambor arrastra un papel graduado, en la coordenada horizontal se obtiene el tiempo y con la coordenada vertical la altura de la precipitación pluvial, que se registra por un objeto que se mueve verticalmente, accionado por un flotador, marcando en el papel la altura de la precipitación.

2.2.4.6. Sensor de radiación solar

Estos sensores se encargan de medir la radiación solar en una banda espectral entre 400 y 1100, midiendo así tanto la radiación incidente como reflejada. Este sensor está constituido por un diodo de silicio que convierte la energía de luz a una señal eléctrica que es acondicionada para obtener una salida analógica de alto nivel.

2.3. Marco Conceptual

2.3.1. Proporción de agua suministrada en el riego del frijol canario

La proporción de agua acorde a las variables climáticas es la empleada en las diferentes etapas del cultivo de frijol canario dependiendo de las condiciones climáticas.

2.3.2. Condiciones climáticas

Las variables climáticas son las condiciones a la que el cultivo se encuentra sometido en todas las etapas del cultivo, estas condiciones son la temperatura, humedad, velocidad del viento, radiación solar y precipitación.

2.4. Sistema de hipótesis

Un sistema automatizado usando el método FAO Penman permite controlar la proporción de agua que se suministra al riego del frijol canario según las condiciones climáticas en un ambiente simulado de la ciudad de Trujillo.

2.5. Variables e indicadores

Tabla 1: Operacionalización de variables.

Variable	Tipo	Dimensión	Indicador	Unidad de medida	Técnica	Instrumento
Proporción de agua que se suministra al riego de frijol canario.	Cuantitativa		Volumen de agua al riego por hectárea	m ³ /ha	Análisis de documentos	Guía de análisis de documentos
Condiciones climáticas de la ciudad de Trujillo.	Cuantitativa	Temperatura	Grados en el ambiente	°F	Análisis de documentos	Guía de análisis de documentos
		Humedad	Velocidad del viento en el ambiente	%		
		Velocidad del viento	Velocidad del viento en el ambiente	kph		
		Radiación solar	Radiación solar en el ambiente	kWh		
		Precipitación	Precipitación en el ambiente	mm		

III. METODOLOGÍA EMPLEADA

3.1. Tipo y nivel de investigación

3.1.1. Tipo y nivel de investigación

3.1.1.1. Tipo de investigación

De acuerdo a la orientación o Finalidad:

Aplicada.

De acuerdo a la técnica de contrastación:

No experimental descriptiva

3.1.1.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación es de tipo descriptivo y evalúa la relación entre las condiciones climáticas de la ciudad de Trujillo y la proporción de agua que se requiere suministrar al el riego del frijol canario.

3.2. Población y muestra de estudio

La población está conformada por el conjunto de datos de las condiciones climáticas de la ciudad de Trujillo con un muestreo no probabilístico durante un periodo de 5 meses consecutivos.

3.3. Diseño de investigación

El diseño para este proyecto de investigación es de tipo transversal de acuerdo con el siguiente esquema:

Tabla 2: Diseño de estudio.

Estudio	T1
Condiciones climatológicas cargadas al simulador.	Cálculo de la proporción de agua que se suministra al riego del frijol canario.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Tabla 3: Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Técnicas	Instrumentos
Análisis de documentos	Guía de análisis de documentos de datos históricos de condiciones climáticas en la ciudad de Trujillo.
Observación	Equipo de medición implementado en el simulador.

3.4.1. Guía de análisis de documentos de datos históricos de condiciones climáticas en la ciudad de Trujillo

Los datos de los valores de las condiciones climáticas de la ciudad de Trujillo, se obtuvieron de su estación meteorológica a través del SENAMHI y el proyecto POWER que proporciona la NASA siguiendo el siguiente procedimiento:

1. De la página web del SENAMHI, disponible en el siguiente enlace:
<https://www.senamhi.gob.pe/?&p=estaciones>
2. En el portal, se selecciona la opción de datos, se despliega una lista de opciones y se elige Datos hidrometeorológicos.

Esta opción direcciona a los Datos Hidrometeorológicos del Perú, muestra un mapa del Perú separado por las regiones, y en cada región muestra las estaciones meteorológicas que posee. Se selecciona la estación meteorológica de la provincia de Trujillo y muestra temperatura y humedad relativa a través de los años, tal como se ilustra en la figura 1.

Datos / Datos Hidrometeorológicos

Datos Hidrometeorológicos a nivel nacional

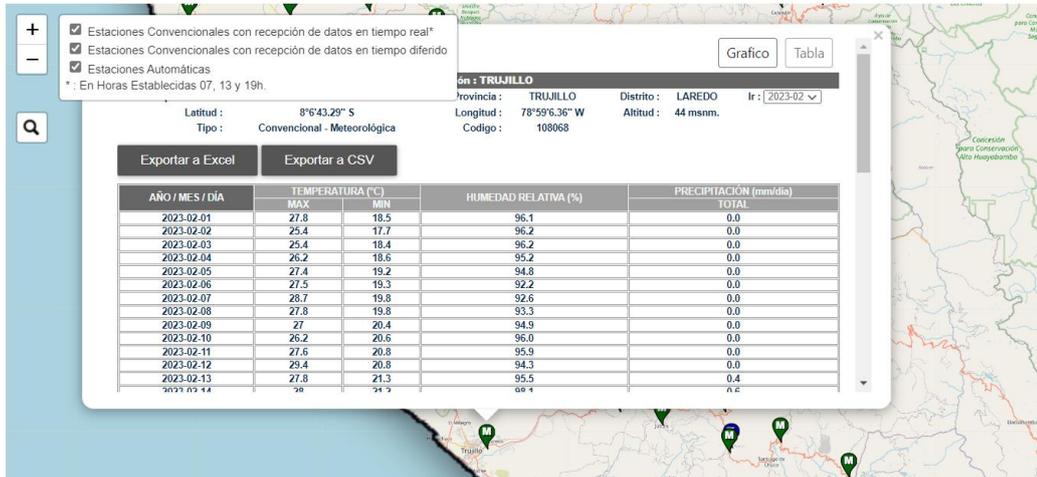


Figura 1: Datos Hidrometeorológicos en la ciudad de Trujillo.

3. Se seleccionan los meses a usar en la simulación, y se exportan en una tabla de Excel para poder modelarlos, estos datos se muestran en la figura 2.

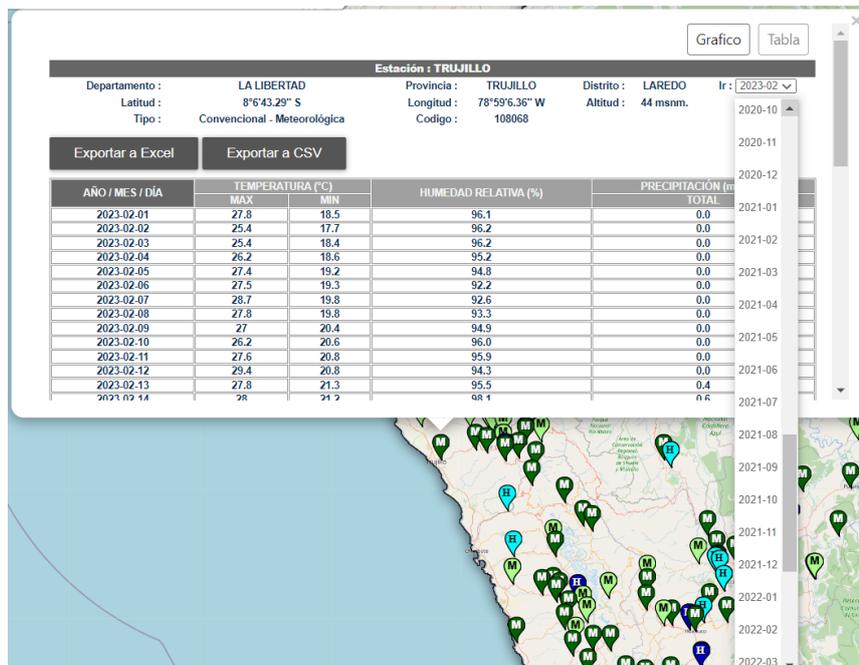


Figura 2: Datos Hidrometeorológicos en la ciudad de Trujillo a través de los años.

4. Se modelan los datos de la temperatura y humedad relativa según se necesite, tal como se ejemplifica en la figura 3.

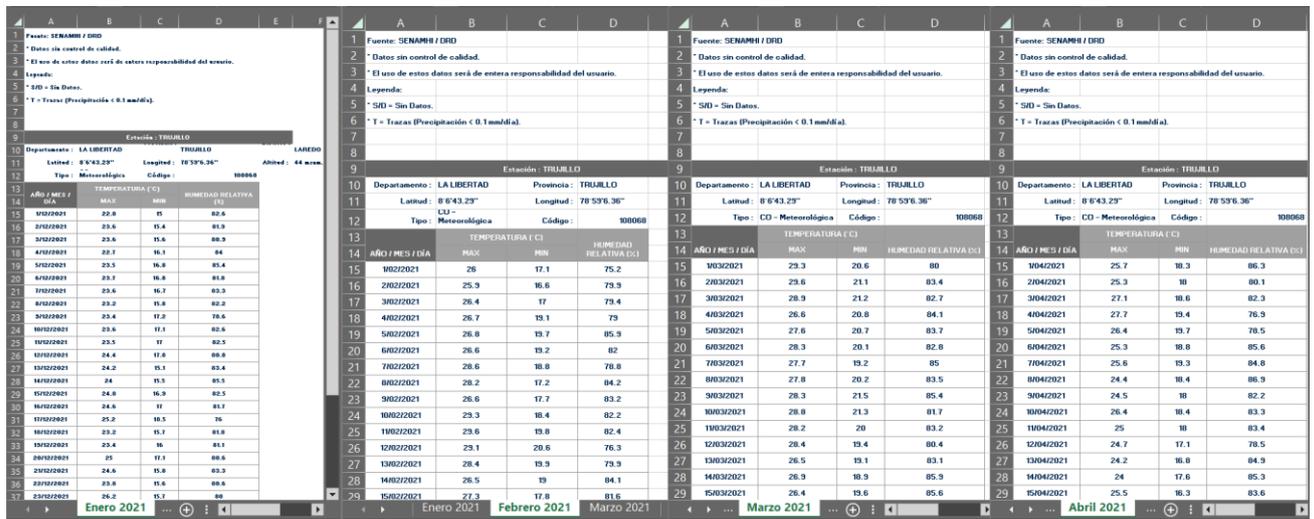


Figura 3: Temperatura y humedad relativa en la ciudad de Trujillo durante todo el año.

5. De la página web del proyecto POWER, disponible en el siguiente enlace:

<https://power.larc.nasa.gov/>, se extraen los datos de radiación solar, precipitación y velocidad del viento, como se muestran en las figuras 4, 5 y 6.

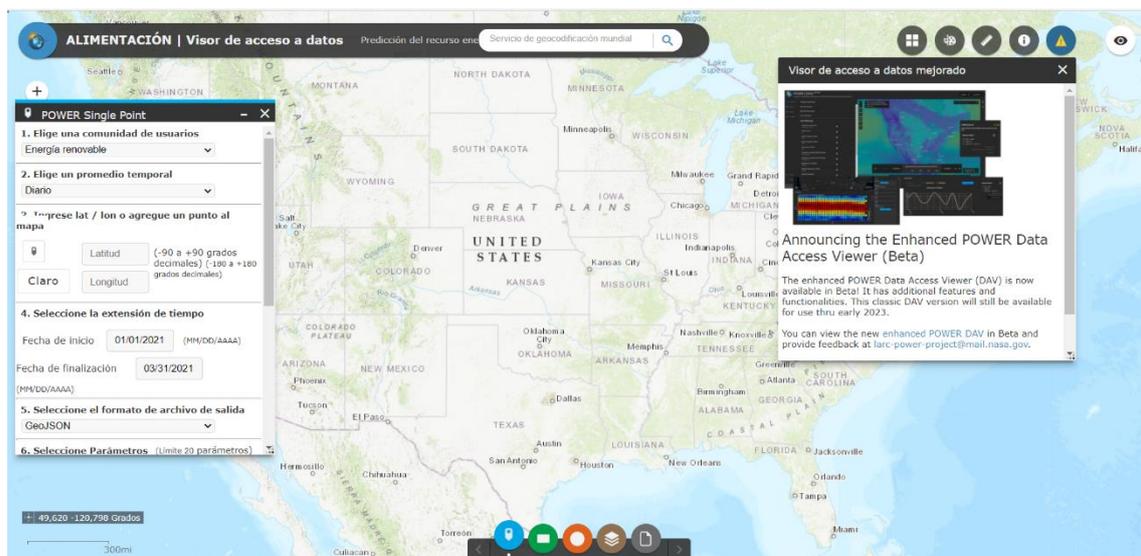


Figura 4: Mapa y cuadro del visor de acceso de datos

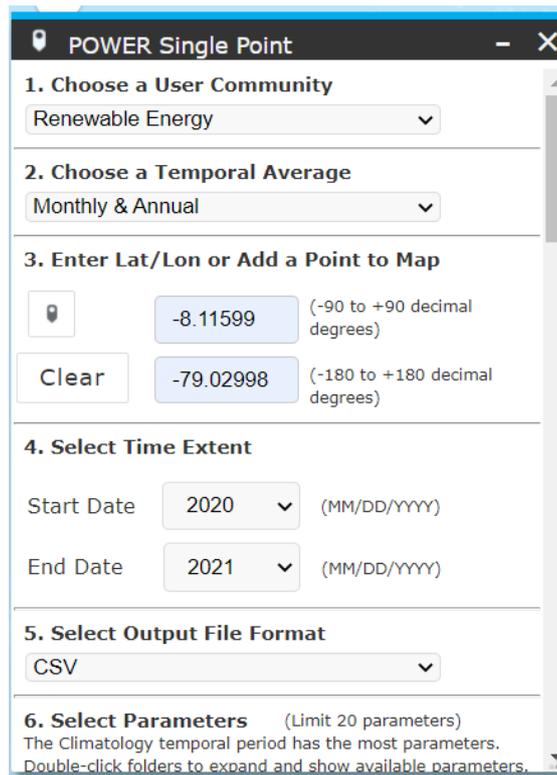


Figura 5: Cuadro del visor de acceso de datos

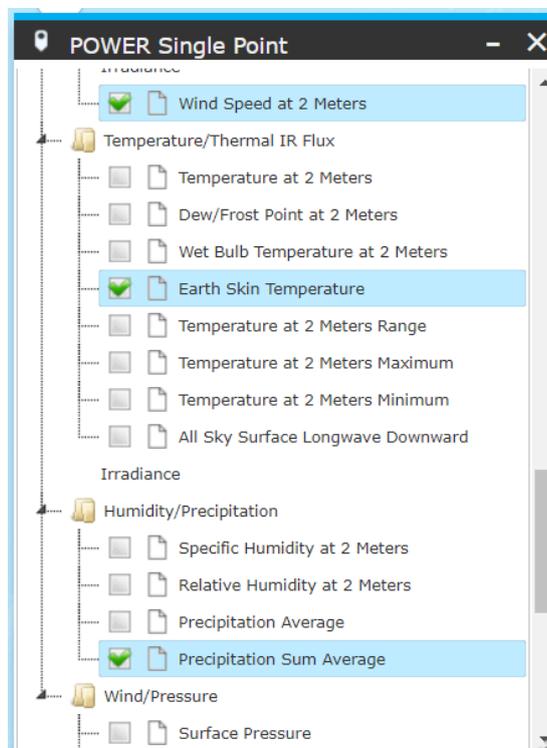


Figura 6: Parámetros del visor de acceso de datos

6. Se exportan los datos de los parámetros climáticos en formato csv y se importan a Excel, tal como se ilustra en la figura 7.

Column1	Col1	Col2	Col3	Col4	Col5	Col6	Col7	Col8	Col9	Col10	Col11	Col12	Col13	Col14	Col15
-BEGIN HEADER-															
NASA/POWER CERES/MERRA2 Native Resolution Monthly and Annual															
Dates (month/day/year): 01/01/2020 through 12/31/2021															
Location: Latitude -8.116 Longitude -79.03															
The value for missing source data that cannot be computed or is outside of the sources availability range: -999															
Parameter(s):															
SR	MERRA-2 SOLAR RADIATION (kWh)														
WS	MERRA-2 WIND SPEED (kph)														
P	MERRA-2 Precipitation Corrected (mm/month)														
PARAMETER	YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC		
SR	2021	6.5	6.2	6	6	5.9	5.8	6.1	6.6	6.8	6.8	6.9	6.7		
WS	2021	11.4	11	11	11.8	12.7	13.1	13.4	13.6	13.5	12.9	12.4	11.9		
P	2021	36	65	78	36	9	4	4	4	6	9	9	12		

Figura 7: Datos extraídos en formato .csv cargados a Excel

7. Se modelan los datos, tal como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4: Tabla de la radiación solar, velocidad del viento y precipitación

Mes	Radiación Solar (kWh)	Velocidad del viento (kph)	Precipitación (mm)
Enero	6.5	11.4	36
Febrero	6.2	11	65
Marzo	6	11	78
Abril	6	11.8	36
Mayo	5.9	12.7	9
Junio	5.8	13.1	4
Julio	6.1	13.4	4
Agosto	6.8	13.6	4
Setiembre	6.8	13.5	6
Octubre	6.8	12.9	9
Noviembre	6.9	12.4	9
Diciembre	6.7	11.9	12

3.4.2. Equipo de medición implementado en el simulador

Usando la metodología FAO Penman se calcula la proporción de agua utilizada de acuerdo con el siguiente procedimiento:

1. Cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia:

La evapotranspiración de cultivo de referencia (ET_o), se calcula utilizando el método de Hargreaves, se usa el factor de evapotranspiración potencial, a través de la siguiente fórmula:

$$ET_o = T (^{\circ}F) \times CH \times MF \dots (3.1)$$

$$CH = 0.166 \sqrt{100 - HR}$$

Donde:

T (°F): Temperatura en grados Fahrenheit

CH: Corrección de humedad, para HR% > 64 %, es igual a 1, para HR% < 64%

MF: Factor de evapotranspiración potencial

HR: Humedad relativa.

A través de la ecuación 3.1, se ha calculado los valores de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), para 5 meses consecutivos, tal como se muestra en la tabla 5, teniendo en consideración que los cálculos se hicieron en las siguientes coordenadas:

Latitud: 8° 6' 42"

Longitud: 79°01'47"

Altitud: 34m

Tabla 5: Cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo).

Parámetro	Mes				
	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
T (°F)	71.96	69.62	67.28	65.3	64.22
HR (%)	86	84	83	83	83
Factor Etp MF	2.362	2.081	1.927	1.75	1.858
CH	0.62	0.66	0.68	0.68	0.68
ETo (mm/mes)	105.57	96.2	88.74	78.21	81.67
ETo (mm/día)	3.4	3.2	2.9	2.6	2.6

2. Cálculo de la evapotranspiración del cultivo:

La evapotranspiración del cultivo se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$ET_c = K_c * E_{To} \dots (3.2)$$

Donde:

ET_c: Evapotranspiración del cultivo (mm / día).

E_{To}: Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm / día).

K_c: Coeficiente del cultivo.

El valor del coeficiente del cultivo de frijol canario que se emplea en la ecuación 3.2, se obtiene a partir de los valores de la tabla 6.

Tabla 6: Duración aproximada de las etapas en el periodo vegetativo y Coeficiente del cultivo (Kc) de frijol canario (*Phaseolus vulgaris* L).

Fases	Duración en días	Temporalidad	Kc
Fase inicial	15	Del 17 de marzo al 31 de marzo	0.5
Fase de desarrollo	35	Del 1 de abril al 5 de mayo	0.8
Fase de floración	40	Del 6 de mayo al 14 de junio	1.05
Fase de recolección	35	Del 15 de junio al 19 de julio	0.9

A través de la ecuación 3.2, se calculan los valores de la evapotranspiración del cultivo (ETc), para 5 meses consecutivos, tal como se muestra en la tabla 7

Tabla 7: Cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ETc).

Fases	Fecha	Duración (días)	ETo (mm/día)	Kc	Etc (mm/día)
Fase inicial	17/3–31/3	15	3.4	0.5	1.7
Fase de desarrollo	1/4-30/4	30	3.2	0.8	2.56
	1/5-5/5	5	2.9		2.32
Fase de floración	6/5-31/5	26	2.9	1.05	3.045
	1/6-14/6	14	2.6		2.73
Fase de recolección	15/6-30/6	16	2.6	0.9	2.34
	1/7-19/7	19	2.6		2.34

3. Cálculo de lámina neta de riego

La lámina neta de riego se calcula en base a la humedad del suelo, densidad aparente, profundidad efectiva de la raíz y el coeficiente de agotamiento. Este último, según (FAO, 2006) en su guía técnica “Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua en los cultivos” indica que el factor de agotamiento adquiere el valor de 0.5 en riegos ligeros. La profundidad de la raíz en el cultivo de frijol canario es de 50mm a 70mm, para un estado de desarrollo pleno, se toma el valor promedio de 60mm.

La lámina neta se calcula con la siguiente fórmula:

$$Ln = \frac{CC-PMP}{100} \times Dap \times Zr \times p \dots (3.3)$$

Donde:

Ln: Lámina neta de riego (mm)

CC: Capacidad del campo

PMP: Punto de marchitez permanente

Dap: Densidad aparente (g / cc)

Zr: Profundidad radicular efectiva del cultivo (60 mm)

p: Fracción de agotamiento (0.50).

El valor de la densidad aparente, punto de marchitez permanente y densidad aparente, que se emplea en la ecuación 3.3, se obtiene a partir de los valores de la tabla 8

Tabla 8: Índice de contenido de humedad del suelo.

Tipo de suelo (Clasificación de la textura del suelo del USDA)	Características de la humedad del suelo		
	CC (%)	PMP (%)	Dap (g/cc)
Franco	20-30	7-17	1.5
Franco Arcilloso	30-37	17-24	1.55
Franco Arenoso	18-28	6-16	1.5
Franco Limoso	22-36	17-29	1.55

Reemplazando los valores se obtiene:

$$Ln = \frac{23 - 11}{100} \times 1.50 \frac{g}{cc} \times 60mm \times 0.5$$

$$Ln = 5.4 mm$$

4. Cálculo de lámina de riego bruto:

La cantidad real de agua que necesita aplicarse en el riego para satisfacer la lámina neta se calcula teniendo en cuenta la eficiencia de riego, teniendo en cuenta el tipo de riego que vamos a emplear. En este caso, el riego por goteo tiene una eficiencia de riego de 90%.

La lámina de riego se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$Lb = \frac{Ln}{Ef} \dots (3.4)$$

Siendo:

Lb: Lámina bruta de riego (mm)

Ln: Lámina neta de riego (mm)

Ef: Eficiencia de riego.

El valor de la eficiencia de riego que se emplea en la ecuación 3.4, se obtiene a partir de los valores de la tabla 9

Tabla 9: Eficiencia según el tipo de riego.

Tipo de riego	Eficiencia de riego (Er)
Riego por aspersión	0.65 – 0.85
Riego por fajas	0.60 – 0.75
Riego por goteo	0.75 – 0.90
Riego por inundación	0.60 – 0.80
Riego por inundación permanente	0.30 – 0.40
Riego por surcos	0.50 – 0.70

Reemplazando los valores se obtiene:

$$Lb = \frac{5.4}{0.9} = 6 \text{ mm}$$

Estos 6mm, representa la lámina que se aplica durante el riego con el fin de cubrir las necesidades hídricas del cultivo durante la evapotranspiración.

5. Cálculo de tiempo de riego:

Para optimizar el riego se necesita conocer el tiempo necesario de la lámina bruta de riego. Para esto, se debe calibrar la lámina deseada y regular el caudal mediante válvulas de control, que permite modificar la intensidad de aplicación del gotero y tiempo de aplicación.

El valor del caudal emisor según la dimensión de la lámina de riego obtenido por la ecuación 3.4, permite establecer el valor de q_c calibrado

que se muestra en la tabla 10, y sirve para calcular la precipitación horaria del sistema con la ecuación 3.6.2.

Tabla 10: Caudal de emisores calibrados para tratamiento.

Tratamientos / caudal	T1	T2	T3	...	T22
Lámina de riego (mm)	4	5	8		22
qe calibrado (l/h)	0.4	0.6	0.8		2.2

Así, para el tratamiento se tiene:

$$Tr = \frac{Lb}{Ib} \dots (3.5.1)$$

Entonces:

$$Ib = \frac{Qe(lh^{-1})}{Dl \times De} \dots (3.5.2)$$

Donde:

Tr: Tiempo de riego (min)

Ib: Precipitación horaria del sistema (mm / h)

De: Distancia entre emisores

DI: Distancia entre laterales

qe: Caudal emisor (l / h)

Reemplazando los valores se obtiene:

$$Ib = \frac{0.6 \text{ lh}^{-1}}{0.7 \times 0.7} = 1.22 \text{ mm / h}$$

El sistema aplicara 1.22 mm por cada hora de operación.

Reemplazando los valores se obtiene:

$$Tr = \frac{6 \text{ mm}}{1.22 \text{ mm}} = 4.91 \text{ h} = 294 \text{ min}$$

6. Cálculo de la frecuencia de riego

Para optimizar el riego se necesita conocer frecuencia de riego. La frecuencia de riego se calcula con la siguiente fórmula:

$$Fr = \frac{Ln}{ETc} \dots (3.6)$$

Siendo:

Fr: Frecuencia de riego

Ln: Lámina neta de riego (mm)

ETc: Evapotranspiración del cultivo (mm / día).

A través de la ecuación 3.6, se calculan los valores de la frecuencia de riego, como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11: Tabla de frecuencia de riego al frijol canario durante 5 meses consecutivos.

	Marzo	Abril	Mayo		Junio		Julio
	Fase inicial	Fase de desarrollo	Fase de desarrollo	Fase de floración	Fase de floración	Fase de recolección	Fase de recolección
Lamina neta (mm)	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
Etc (mm/día)	1.70	2.57	2.29	3.01	2.74	2.35	2.37
Frecuencia	3.2	2.1	2.4	1.8	2.0	2.3	2.3

7. Cálculo de días de riego

Para optimizar el riego se necesita conocer los días de riego. Los días de riego se calculan con la siguiente fórmula:

$$D_r = \frac{D}{F_r} \dots (3.7)$$

Siendo:

Dr: Días de riego

Fr: Frecuencia de riego

D: Duración de la fase

A través de la ecuación 3.7, se ha calculado los valores los días de riego, para 5 meses consecutivos, tal como se muestra en la tabla 12.

Tabla 12: Tabla de días de riego al frijol canario durante 5 meses consecutivos.

Mes	Marzo	Abril	Mayo		Junio		Julio
Fases	Fase inicial	Fase de desarrollo	Fase de desarrollo	Fase de floración	Fase de floración	Fase de recolección	Fase de recolección
Frecuencia	3.2	2.1	2.4	1.8	2.0	2.3	2.3
Días	15	30	5	26	14	16	19
Días de riego	4.7	14.3	2.1	14.5	7.1	7.0	8.3

8. Cálculo de las horas de riego

Para optimizar el riego se necesita conocer las horas de riego. Las horas de riego se calculan con la siguiente fórmula:

$$Hr = Dr * Tr \dots (3.8)$$

Siendo:

Hr: Horas de riego

Dr: Días de riego

Tr: Tiempo de riego

A través de la ecuación 3.8, se ha calculado los valores de las horas de riego, para 5 meses consecutivos, tal como se muestra en la tabla 13.

Tabla 13: Tabla de horas de riego al frijol canario durante 5 meses consecutivos.

Mes	Marzo	Abril	Mayo		Junio		Julio
Fases	Fase inicial	Fase de desarrollo	Fase de desarrollo	Fase de floración	Fase de floración	Fase de recolección	Fase de recolección
Días de riego	4.7	14.3	2.1	14.5	7.1	7.0	8.3
Horas de riego	6.6	20.0	3.0	20.3	9.9	9.7	11.7

9. Cálculo del volumen de riego

Para optimizar el riego se necesita conocer el volumen de riego. Las horas de riego se calculan con la siguiente fórmula:

$$V_r = H_r * L_b \dots (3.9)$$

Siendo:

V_r: Volumen de riego

H_r: Horas de riego

L_b: Lamina bruta (mm)

A través de la ecuación 3.9, se ha calculado los valores del volumen de riego, para 5 meses consecutivos, tal como se muestra en la tabla 14.

Tabla 14: Tabla de volumen de riego al frijol canario durante 5 meses consecutivos.

Mes	Marzo	Abril	Mayo		Junio		Julio
Fase	Fase inicial	Fase de desarrollo	Fase de desarrollo	Fase de floración	Fase de floración	Fase de recolección	Fase de recolección
Horas de riego	6.6	20.0	3.0	20.3	9.9	9.7	11.7
Volumen de riego	39.7	119.7	17.8	121.6	59.6	58.4	70.1

10. Teniendo estos datos, se genera la tabla 15, que contiene la proporción de agua suministrada al frijol canario durante 5 meses consecutivos.

Tabla 15: Tabla de proporción de agua suministra al frijol canario durante 5 meses consecutivos.

Mes	Marzo	Abril	Mayo		Junio		Julio
Fase	Fase inicial	Fase de desarrollo	Fase de desarrollo	Fase de floración	Fase de floración	Fase de recolección	Fase de recolección
Lamina neta (mm)	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
Etc (mm/día)	1.70	2.57	2.29	3.01	2.74	2.35	2.37
Frecuencia	3.2	2.1	2.4	1.8	2.0	2.3	2.3
Días	15	30	5	26	14	16	19
Días de riego	4.7	14.3	2.1	14.5	7.1	7.0	8.3
Horas de riego	6.62	19.95	2.97	20.26	9.94	9.73	11.68
Volumen de riego (m ³)	39.73	119.72	17.81	121.56	59.62	58.40	70.08
Volumen de riego (m ³ /ha)	278.12	838.01	124.68	850.91	417.31	408.80	490.53

3.5. Procesamiento y análisis de datos

Los datos recolectados, se han procesado para obtener lo siguiente:

- Tabla de niveles de las condiciones climáticas en la ciudad de Trujillo durante 5 meses consecutivos.
- Curva de proporción de agua suministrada al frijol canario durante 5 meses consecutivos.
- Variabilidad de la curva de proporción de agua suministrada al frijol canario con respecto a los valores teóricos.
- Relación de condiciones climáticas con respecto a la productividad del frijol canario
- Estimación el rendimiento del sistema automatizado mediante simulación.

3.5.1. Tabla de niveles de condiciones climáticas en la ciudad de Trujillo durante 5 meses

En la tabla 16, se muestra el procesamiento de los datos obtenidos mediante la guía de análisis de documentos de datos históricos de condiciones climáticas en la ciudad de Trujillo durante los meses de marzo a Julio.

Tabla 16: Niveles de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y precipitación en la ciudad de Trujillo durante 5 meses consecutivos.

Coordenadas:

Latitud: 8° 6' 42'

Longitud: 79°01'47"

Altitud: 34m

Parámetro / Mes	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
T (°F)	71.96	69.62	67.28	65.30	64.22
HR (%)	86.00	84.00	83.00	83.00	83.00
Velocidad de viento (kph)	11.0	11.8	12.7	13.1	13.4
Radiación solar (kWh)	6.0	6.0	5.9	5.8	6.1
Precipitación (mm)	78	36	9	4	4

3.5.2. Curva de proporción de agua suministrada al frijol canario durante 5 meses

En la figura 8, se grafican los datos obtenidos del volumen de agua de la tabla 15.

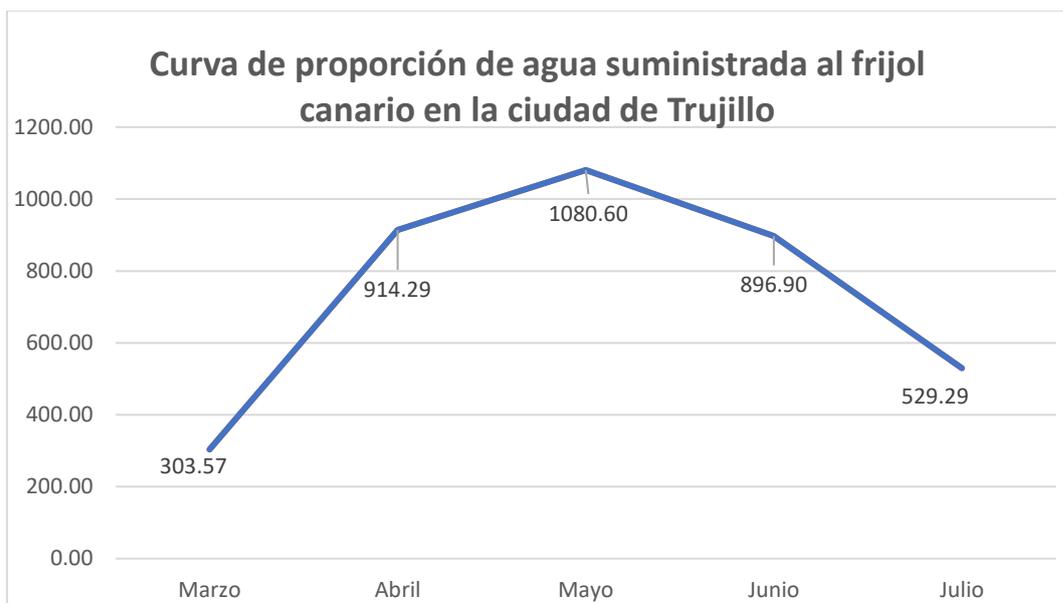


Figura 8: Gráfico de la curva de proporción de agua suministrada al frijol canario en la ciudad de Trujillo

3.5.3. Variabilidad de la curva de proporción de agua suministrada al frijol canario con respecto a los valores teóricos

En la figura 9, se grafican los datos obtenidos del volumen de agua de la tabla 14 y los datos tradicionales de consumo de agua en el frijol canario, establecidos en 800 m³/ha por mes.

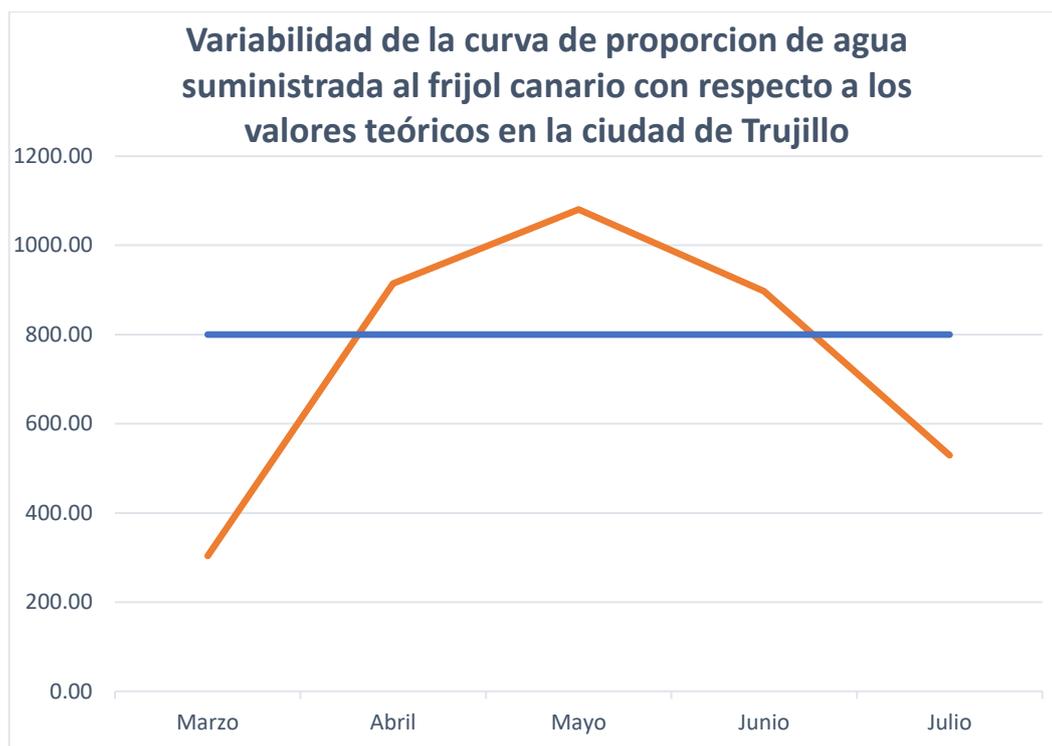


Figura 9: Gráfico de la variabilidad de la curva de proporción de agua suministrada al frijol canario con respecto a los valores teóricos en la ciudad de Trujillo

Los cultivos de frijol requieren una distinta necesidad hídrica por mes, lo cual afecta su productividad, ocasionando pérdidas en su producto. Según su etapa de cultivo, tiene una necesidad mayor o menor de agua.

En el riego tradicional de cultivo de frijol, se emplean de 3600 m³/ha a 4000 m³/ha, empleando riegos homogéneos en los 5 meses de cultivo. Esta cantidad de agua es perjudicial en los cultivos en el 1er, 3er y 5to mes, ya que el exceso de agua en el 1er y 3er mes provoca mayor cantidad de plagas y descomposición en las

semillas, y la falta de agua en el 3er mes provoca perdida de semillas por resequedad.

De la figura 9, se observa que la variabilidad de proporción de agua que requiere el cultivo de frijol canario es como la tabla 17.

Tabla 17: Tabla de variabilidad de proporción de agua que requiere el cultivo de frijol canario.

Mes	Proporción de agua requerida en el riego tradicional (m³/ha)	Proporción de agua requerida según el método FAO Penman (m³/ha)	Diferencia (m³/ha)
Marzo	800	278.12	521.88
Abril	800	838.01	-38.01
Mayo	800	975.59	-175.59
Junio	800	826.11	-26.11
Julio	800	490.53	309.47
Total	4000	3408.35	591.65

3.5.4. Relación de condiciones climáticas con respecto a la productividad del frijol canario

En la tabla 18, se muestran los datos de las condiciones climáticas y el volumen de riego por hectárea requerido para el cultivo obtenido para los meses de marzo a julio.

Tabla 18: Tabla de relación de condiciones climáticas y la proporción de agua requerida en el riego de frijol canario.

Parámetro / mes	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
T (°F)	71.96	69.62	67.28	65.30	64.22
HR (%)	86.00	84.00	83.00	83.00	83.00
Velocidad del viento (kph)	11.0	11.8	12.7	13.1	13.4
Radiación solar (kWh)	6.0	6.0	5.9	5.8	6.1
Precipitación (mm)	78	36	9	4	4
Volumen de riego (m ³ /ha)	278.12	838.01	975.59	826.11	490.53

El cultivo de frijol canario se adapta perfectamente a los valles de la costa norte, en siembras de otoño a invierno (marzo a julio).

Teniendo marzo la mayor precipitación en todos los meses, una baja radiación solar y el porcentaje de humedad más alto en la libertad, convierte a este en el clima ideal para la fase inicial del cultivo de frijol canario.

Al tener una alta precipitación el mes de marzo, esto nos permite reducir la cantidad de agua que se va a emplear.

Como se observa en la tabla 18, las condiciones climáticas no influyen proporcionalmente en el volumen requerido, el método FAO Penman permite determinar la estimación del volumen de riego necesario para un determinado mes de acuerdo con la condición climática.

3.5.5. Estimación del rendimiento del sistema automatizado mediante simulación

Al realizar la simulación del sistema automatizado durante los meses de marzo, abril, mayo, junio y julio, como se ilustra en la figura 10.

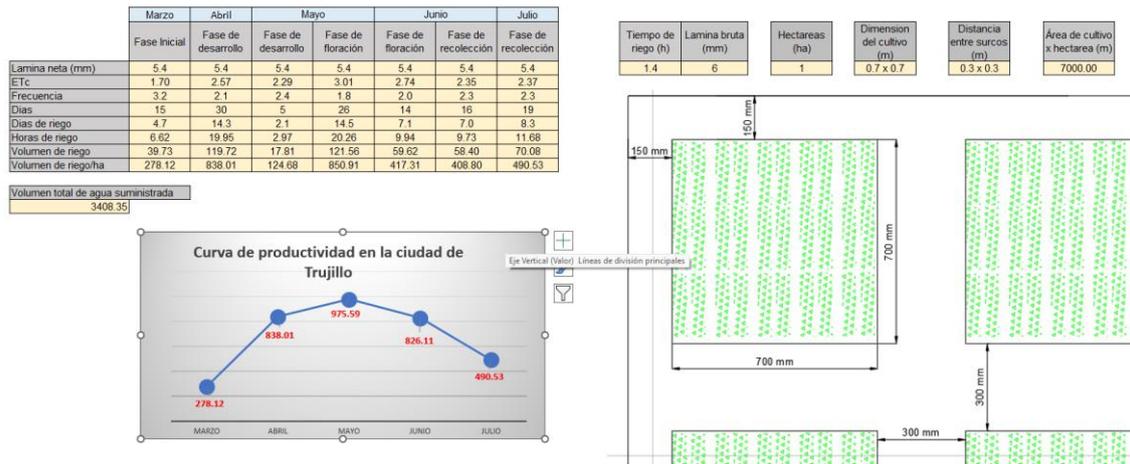


Figura 10: Simulación del sistema automatizado durante los meses de marzo, abril, mayo, junio y julio

Se obtiene una proporción total de agua suministrada de 3408.35 m³/ha.

Al realizar la simulación del sistema automatizado durante los meses de enero, febrero, marzo, abril y mayo, como se ilustra en la figura 11.

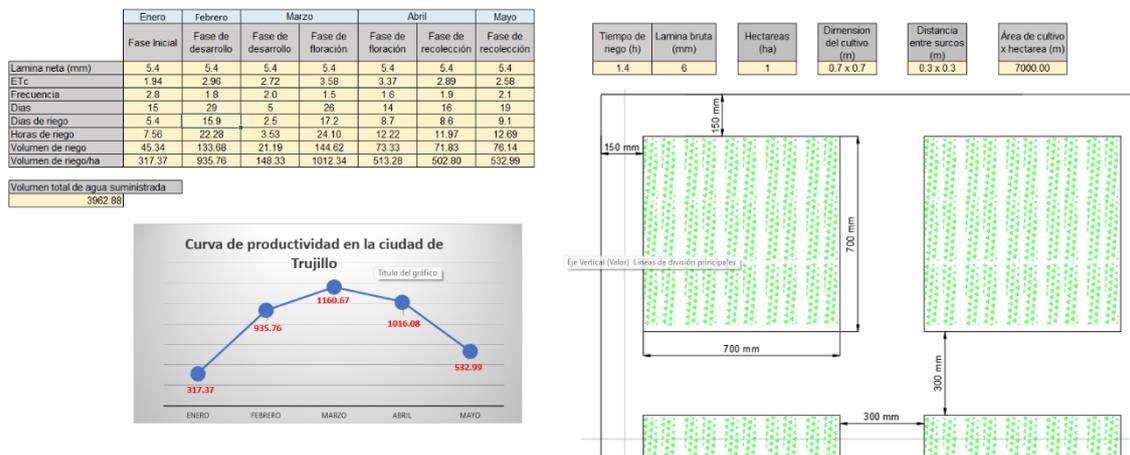


Figura 11: Simulación del sistema automatizado durante los meses de enero, febrero, marzo, abril y mayo

Se obtiene una proporción total de agua suministrada de 3962.88 m³/ha.

Al realizar la simulación del sistema automatizado durante los meses de mayo, junio, julio, agosto y setiembre, como se ilustra en la figura 12.

	Mayo	Junio	Julio		Agosto		Setiembre
	Fase inicial	Fase de desarrollo	Fase de desarrollo	Fase de floración	Fase de floración	Fase de recolección	Fase de recolección
Lamina neta (mm)	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
ETc	1.43	2.09	2.11	2.77	4.50	3.85	2.97
Frecuencia	3.8	2.6	2.6	2.0	1.2	1.4	1.8
Días	15	30	5	26	14	16	19
Días de riego	4.0	11.6	2.0	13.3	11.7	11.4	10.5
Horas de riego	5.57	10.22	2.75	18.05	16.32	15.98	14.05
Volumen de riego	33.40	97.33	16.39	111.88	97.91	95.91	87.88
Volumen de riego/ha	233.77	681.33	114.74	783.13	685.35	671.37	615.17
Volumen total de agua suministrada	3784.86						

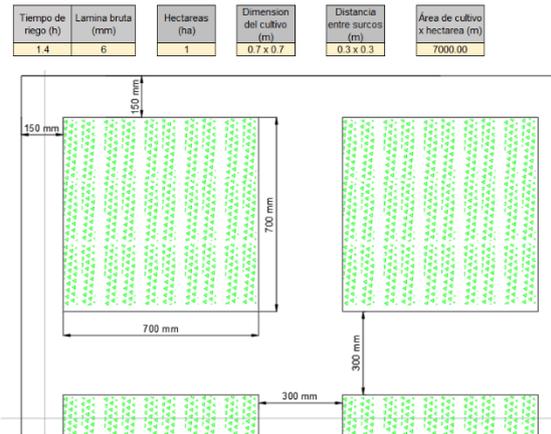


Figura 12: Simulación del sistema automatizado durante los meses de mayo, junio, julio, agosto y setiembre

Se obtiene una proporción total de agua suministrada de 3784.86 m³/ha.

Al realizar la simulación del sistema automatizado durante los meses de julio, agosto, setiembre, octubre y noviembre, como se ilustra en la figura 13.

	Julio	Agosto	Setiembre		Octubre		Noviembre
	Fase inicial	Fase de desarrollo	Fase de desarrollo	Fase de floración	Fase de floración	Fase de recolección	Fase de recolección
Lamina neta (mm)	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
ETc	1.32	3.43	2.64	3.47	3.85	3.30	3.44
Frecuencia	4.1	1.6	2.0	1.6	1.4	1.6	1.6
Días	15	30	5	26	14	16	19
Días de riego	3.7	19.0	2.4	16.7	10.0	9.8	12.1
Horas de riego	5.12	26.64	3.43	23.38	13.96	13.67	16.97
Volumen de riego	30.74	159.85	20.56	140.30	83.74	82.03	101.78
Volumen de riego/ha	215.15	1118.94	143.90	982.12	586.16	574.20	712.53
Volumen total de agua suministrada	4333.01						

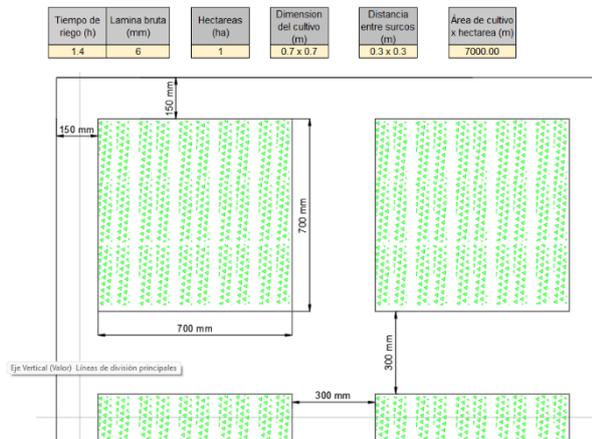


Figura 13: Simulación del sistema automatizado durante los meses de julio, agosto, setiembre, octubre y noviembre

Se obtiene una proporción total de agua suministrada de 4333.01 m³/ha.

Al realizar la simulación del sistema automatizado durante los meses de setiembre, octubre, noviembre, diciembre y enero, como se ilustra en la figura 14.

	Setiembre	Octubre	Noviembre		Diciembre		Enero
	Fase inicial	Fase de desarrollo	Fase de desarrollo	Fase de floración	Fase de floración	Fase de recolección	Fase de recolección
Lamina neta (mm)	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
ETc	1.65	2.93	3.06	4.02	4.07	3.49	3.52
Frecuencia	3.3	1.8	1.8	1.3	1.3	1.5	1.5
Días	15	30	5	26	14	16	19
Días de riego	4.6	16.3	2.8	19.3	10.6	10.3	12.4
Horas de riego	6.42	22.79	3.97	27.08	14.78	14.48	17.33
Volumen de riego	38.54	136.71	23.81	162.51	88.67	86.86	103.95
Volumen de riego/ha	269.81	957.00	166.67	1137.55	620.68	608.01	727.67

Volumen total de agua suministrada
4487.40

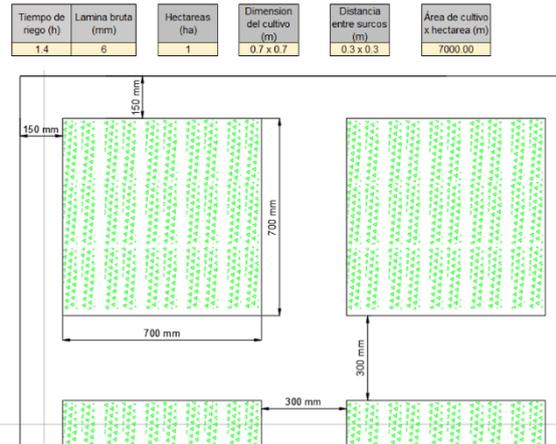


Figura 14: Simulación del sistema automatizado durante los meses de setiembre, octubre, noviembre, diciembre y enero

Se obtiene una proporción total de agua suministrada de 4487.40 m³/ha.

Realizada la simulación del sistema automatizado variando el inicio del mes, se ha obtenido el volumen total de agua que se requiere para el cultivo del frijol canario, tal como se muestra en la tabla 19.

Tabla 19: Volumen de agua suministrada según el mes de inicio del cultivo de frijol canario

Mes	Volumen total de agua suministrada
Enero	3995.15
Febrero	3677.85
Marzo	3408.35
Abril	3530.51
Mayo	3530.51
Junio	4089.41
Julio	4333.01
Agosto	4395.73
Setiembre	4487.40
Octubre	4632.91
Noviembre	4648.62
Diciembre	4621.39

IV. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Resultados

4.1.1. Condiciones climáticas de la ciudad de Trujillo.

Las condiciones climáticas de la ciudad de Trujillo se presentan en la tabla 20.

Tabla 20: Condiciones climáticas de la ciudad de Trujillo.

Parámetros / mes	Temperatura (°F)	Humedad relativa (%)	Precipitación (mm)	Velocidad del viento (kph)	Radiación solar (kWh)
Enero	70.52	83	36	11.4	6.5
Febrero	72.32	84	65	11	6.2
Marzo	71.96	86	78	11	6.0
Abril	69.62	84	36	11.8	6.0
Mayo	67.28	83	9	12.7	5.9
Junio	65.3	83	4	13.1	5.8
Julio	64.22	83	4	13.4	6.1
Agosto	63.5	83	4	13.6	6.6
Setiembre	63.68	82	6	13.5	6.8
Octubre	64.22	81	9	12.9	6.8
Noviembre	65.48	81	9	12.4	6.9
Diciembre	68	82	15	11.9	6.7

Como se observa en la tabla 20:

- La temperatura máxima se presenta en el mes de febrero, mientras que la temperatura mínima en el mes de agosto.
- La humedad relativa máxima se presenta en el mes de marzo, mientras que la humedad relativa mínima se presenta en los meses de octubre y noviembre.
- La precipitación máxima se presenta en el mes de marzo, mientras que a precipitación mínima en los meses de junio, julio y agosto.

- La velocidad del viento máxima se presenta en el mes de agosto, mientras que la velocidad del viento mínima se presenta en los meses de febrero y marzo.
- La radiación solar máxima se presenta en el mes de noviembre, mientras que la radiación solar mínima se presenta en el mes de junio.

4.1.2. Parámetros de evapotranspiración establecidos por el método FAO Penman.

Los parámetros de evapotranspiración por el método FAO Penman, se presentan en la tabla 21.

Tabla 21: Parámetros de evapotranspiración establecidos por el método FAO Penman.

Mes	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio		
Parámetros	Fase Inicial	Fase de desarrollo	Fase de desarrollo	Fase de floración	Fase de floración	Fase de recolección	Fase de recolección
Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/día)	3.4	3.2	2.9	2.9	2.6	2.6	2.6
Corrección de humedad	0.62	0.66	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
Factor de evapotranspiración potencial	2.362	2.081	1.927	1.927	1.75	1.75	1.858
Evapotranspiración del cultivo (mm/día)	1.7	2.56	2.32	3.045	2.73	2.34	2.34
Coefficiente del cultivo	0.5	0.8	0.8	1.05	1.05	0.9	0.9
Lámina neta de riego (mm)	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
Lámina de riego bruto (mm)	6	6	6	6	6	6	6
Tiempo de riego (min)				294			
Precipitación horaria del sistema (mm/h)				1.22			
Frecuencia de riego	3.2	2.1	2.4	1.8	2	2.3	2.3
Días de riego	4.7	14.3	2.1	14.5	7.1	7	8.3

Horas de riego (h)	6.6	20	3	20.3	9.9	9.7	11.7
Volumen de riego (m ³ /ha)	278.12	838.01	124.68	850.91	417.31	408.80	490.53

Como se observa en la tabla 21, el volumen máximo de riego suministrado se presenta en el mes de mayo, con un total de 975.59 m³/ha, mientras que el valor mínimo de riego se encuentra en el mes de enero con un total de 278.12 m³/ha.

4.1.3. Propuesta de la arquitectura del sistema automatizado

El diagrama de bloques propuesto del sistema de riego automatizado se muestra en la figura 15 y el diagrama de flujo propuesto se muestra en la figura 16.

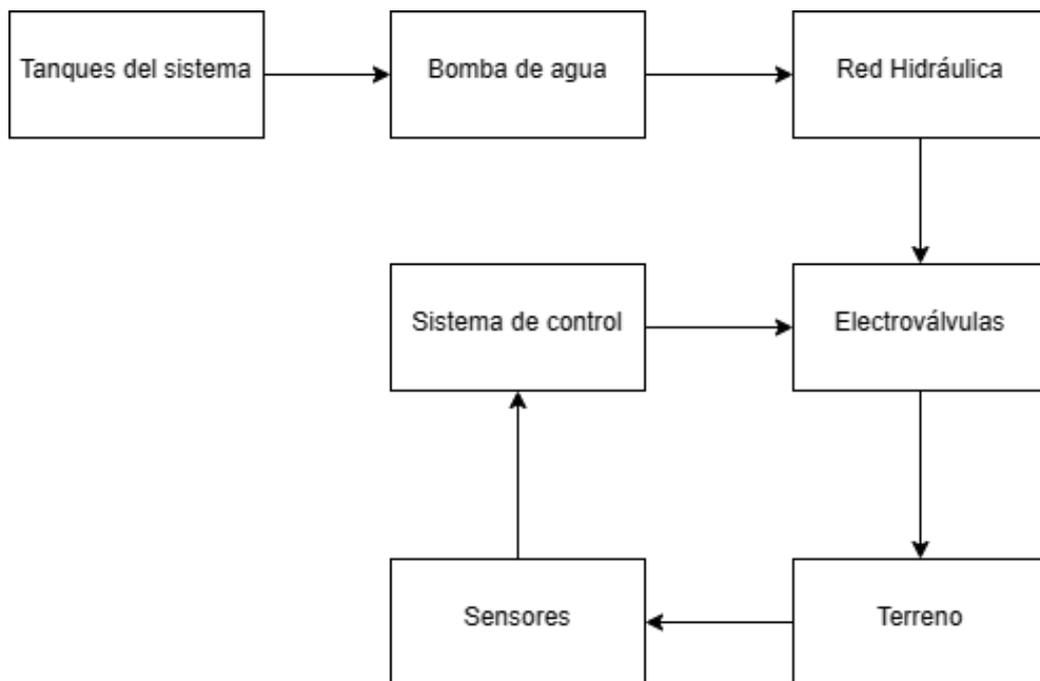


Figura 15: Diagrama de bloques del sistema de riego.

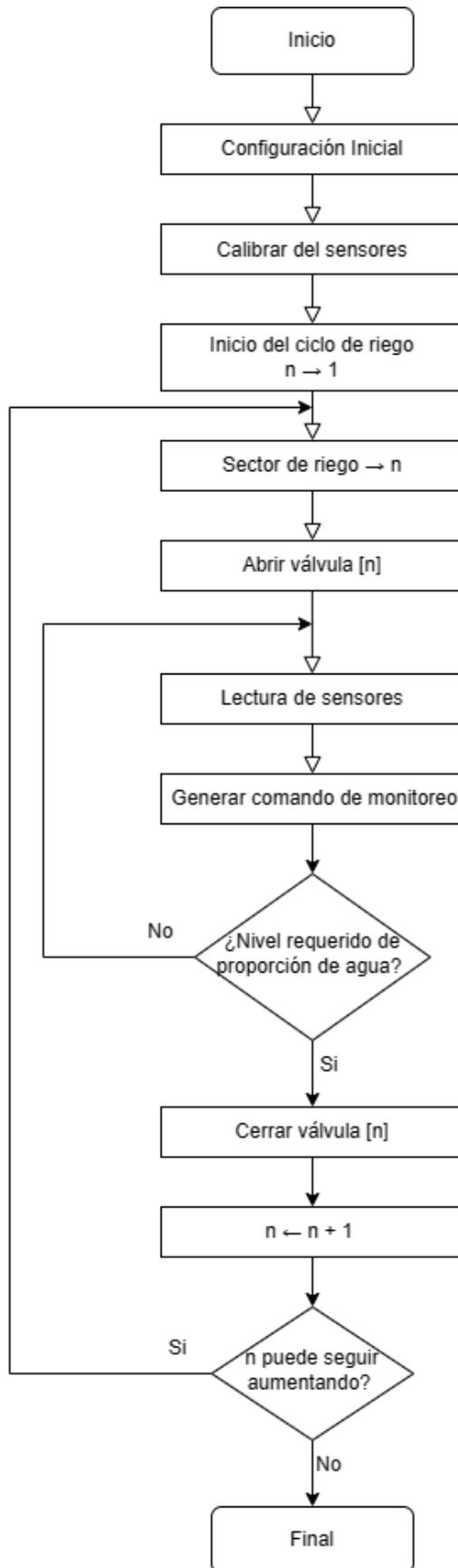


Figura 16: Diagrama de flujo del sistema de riego automatizado.

Para la implementación de la arquitectura del sistema de riego automatizado se propone:

- Bomba de agua

El riego por goteo no requiere de mucha presión. Para este tipo de riego se emplea una presión de 1 o 2 bares, debido a que los componentes están diseñados para trabajar en un nivel bajo de presión, con un suministro lento y constante de agua.

Se propone una bomba de agua centrífuga de 1HP, como la Electrobomba Centrífuga Pedrollo CPM 1HP 620 como se ve en la figura 17.



Figura 17: Electrobomba Centrífuga Pedrollo COM 1HP 620.

- Tanques del sistema

Los tanques del sistema nos servirán como reserva de agua. Se emplearía un grupo de 3 tanques de agua de 1200 litros, dándonos un total de 3600 litros de reserva de agua para el sistema de riego, como se observa en la figura 18.



Figura 18: Tanque de agua de 1200 litros.

- Red hidráulica

La red hidráulica son las tuberías, válvulas y conectores que se usaran en el sistema.

- Tubería de polietileno de 32 mm

La tubería de polietileno de 32 mm, como se observa en la figura 19, es de material flexible, resistente a rayos uv y a la intemperie. Esta tubería sería la encargada de desplazar el agua proveniente de los tanques.



Figura 19: Tubería de polietileno de 32mm.

- Conector inicial

Este conector que se observa en la figura 20 nos permite pasar de la tubería de polietileno de 32 mm a una tubería de polietileno de 16 mm.



Figura 20: Conector inicial.

- Tubería de polietileno de 16 mm
La tubería de polietileno de 32 mm, como se observa en la figura 21, es de material flexible, resistente a rayos uv y a la intemperie. En esta tubería estarían ubicados los goteros.



Figura 21: Tubería de polietileno de 16mm.

- Gotero auto compensable RIEGOPRO
Se utilizará un gotero auto compensable RIEGOPRO, como se muestra en la figura 22, ya que este es ideal para terrenos irregulares y con desniveles, y su tipo de gotero tiene un caudal constante de 4 litros por hora.



Figura 22: Gotero auto compensable RIEGOPRO.

- Válvula de unión de 16 mm
Esta válvula que se observa en la figura 23 es un respaldo manual en caso se deba cerrar el sistema de red hidráulica.



Figura 23: Válvula de unión de 16mm.

- Tapón de presión de 16 mm
Este tapón que se observa en la figura 24 permite detener el flujo al final de la red hidráulica.



Figura 24: Tapón de presión de 16mm.

- Toma hembra de ½ pulgada
Esta toma, que se ve en la figura 25, nos permite unir la red hidráulica con la electroválvula.

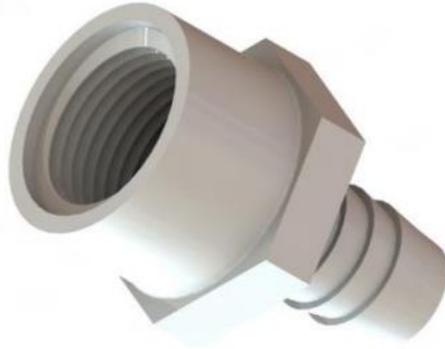


Figura 25: Toma hembra de ½ pulgada.

- Electroválvulas

Las electroválvulas o válvulas solenoides, como se muestran en la figura 26, realizan la función de abrir y cerrar la válvula, esta funciona a través de una bobina. Las electroválvulas que se usarían serían normalmente cerradas de 220v, debido a las largas distancias, para mantener una red eléctrica estable y permanente.



Figura 26: Electroválvula normalmente cerrada de 220 V.

- Sensores

- Sensor DHT11

Es un sensor que mide la temperatura y humedad relativa, la cual nos permitirá el monitoreo del cultivo.

Este sensor, que se muestra en la figura 27, tiene comunicación lineal con Arduino, la cual por medio de una librería preestablecida nos permite obtener el nivel de temperatura y humedad relativa.

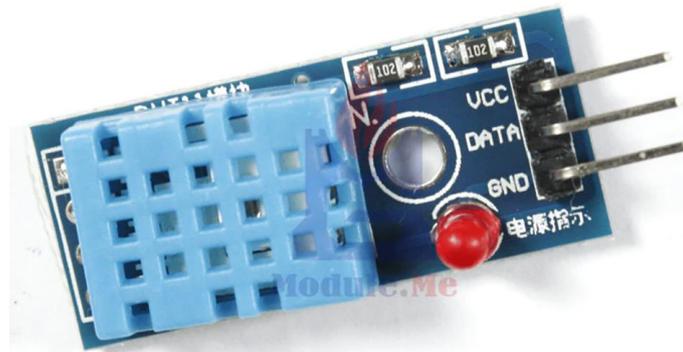


Figura 27: Sensor DHT11.

- Sensor ML8511

Es un sensor que mide la radiación solar del medio ambiente.

Este sensor detecta la luz a una longitud entre 280 nm a 390 nm, cubre tanto el espectro UV-B como al UV-A.

Este sensor, que se muestra en la figura 28, tiene comunicación lineal con Arduino, la cual por medio de una librería preestablecida nos permite obtener el nivel de radiación solar.

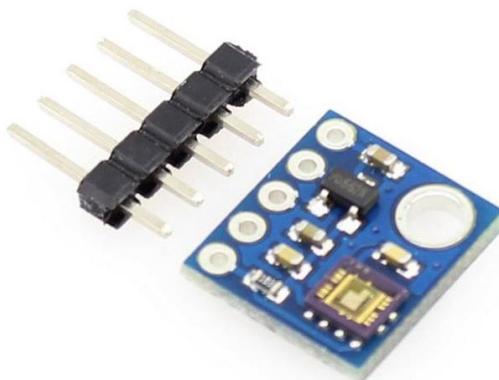


Figura 28: Sensor ML8511.

- Sensor YL-83

Este sensor, que se muestra en la figura 29, se encarga de tomar datos sobre la precipitación que cae en la superficie terrestre en sus diferentes formas, tales como lluvia, granizo u nieve. Este sensor consta de un tambor que rota a una velocidad constante, este tambor arrastra un papel graduado, en la coordenada horizontal se obtiene el tiempo y con la coordenada vertical la altura de la precipitación pluvial, que se registra por un objeto que se mueve verticalmente, accionado por un flotador, marcando en el papel la altura de la precipitación.

Este sensor tiene comunicación lineal con Arduino, la cual por medio de una librería preestablecida nos permite obtener el nivel de precipitación.



Figura 29: Sensor YL-83.

- Anemómetro JL-FS2

Es un sensor que mide la velocidad instantánea del viento. Está formado por una esfera hueca y ligera, cuya posición respecto a un punto de suspensión varía según la fuerza del viento, la cual se mide en un cuadrante. Estos sensores miden la velocidad del viento durante intervalos de tiempo, y usando el valor medio de estos, debido a que las ráfagas de viento desvirtúan las medidas.

Este sensor, como se muestra en la figura 30, tiene comunicación lineal con Arduino, la cual por medio de una librería preestablecida nos permite obtener el nivel de velocidad del viento.



Figura 30: Anemómetro JL-FS2.

- Microcontrolador Arduino 2560

Se utiliza un microcontrolador Arduino 2560, como se muestra en la figura 31, para recibir información de los sensores y enviar información a los actuadores, permitiendo así el control del sistema de riego, para el encendido y apagado de electroválvulas y bombas.



Figura 31: Microcontrolador Arduino 2560.

4.1.4. Estimación Rendimiento del diseño propuesto

En la simulación del sistema automatizado, se tomaron distintos puntos de inicio para el cultivo del frijol canario, dándonos como resultado la curva de proporción correspondiente al mes de inicio, y el volumen total de agua suministrada durante 5 meses consecutivos.

Luego de esto, se evaluó el inicio para cada mes de cultivo del frijol canario, como se observa en la tabla 22, dando como resultado el total de agua suministrada según el inicio del mes. Al evaluar la tabla, se observa que, iniciando el cultivo en el mes de marzo, se logra mejorar la productividad del frijol canario, porque en este mes las necesidades hídricas del frijol son menores a las necesidades hídricas en los riegos de cultivos tradicionales.

Tabla 22: Volumen total de agua suministrada durante 5 meses consecutivos iniciando en cada mes del año.

Parámetros / mes	Temperatura (°F)	Humedad relativa (%)	Precipitación (mm)	Velocidad del viento (kph)	Radiación solar (kWh)
Enero	70.52	83	36	11.4	6.5
Febrero	72.32	84	65	11	6.2
Marzo	71.96	86	78	11	6.0
Abril	69.62	84	36	11.8	6.0
Mayo	67.28	83	9	12.7	5.9
Junio	65.3	83	4	13.1	5.8
Julio	64.22	83	4	13.4	6.1
Agosto	63.5	83	4	13.6	6.6
Setiembre	63.68	82	6	13.5	6.8
Octubre	64.22	81	9	12.9	6.8
Noviembre	65.48	81	9	12.4	6.9
Diciembre	68	82	15	11.9	6.7

4.2. Docimasia de hipótesis

En base a los resultados presentados de la simulación, se demuestra que el sistema automatizado basado en el método FAO Penman permite controlar la proporción de agua que se suministra al riego del frijol canario según las condiciones climáticas de la ciudad de Trujillo.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- Dos parámetros importantes para evaluar el desempeño de la simulación son el tiempo de riego (T_r) y la precipitación horaria del sistema (I_b); ambos son calculados usando la metodología de FAO Penman de evaluación de daños y pérdidas, esta nos proporcionó una serie de procedimientos a seguir para calcular el suministro de agua necesaria para el cultivo. La metodología usada favorece en el desarrollo del proyecto.
- Al evaluar los resultados obtenidos de las necesidades hídricas por etapa de cultivo y volumen total de agua suministrada en el cultivo de un sistema automatizado basado en el método FAO Penman para controlar la proporción de agua suministrada al frijol canario según las condiciones climáticas en un ambiente simulado de la ciudad de Trujillo, con las necesidades hídricas en los riegos tradicionales de frijol canario en la ciudad de Trujillo, se encontró, que el riego con un sistema automatizado mejora la productividad en el cultivo del frijol, en primer lugar debido a que requiere de un menor volumen de agua para su cultivo a diferencia del riego tradicional. En segundo lugar, el sistema automatizado permite determinar en qué meses se necesita mayor o menor volumen de agua, esta información evita pérdidas en los cultivos. Y, por último, el sistema automatizado permite descubrir en que mes es más favorable iniciar con el cultivo.
- Al evaluar los datos teóricos con la simulación del sistema automatizado con cada mes, se determinó que el mejor mes para iniciar el cultivo del frijol canario es marzo, debido a que es el mes de mayor precipitación de agua, y que se vió reflejado en el volumen total de agua suministrada, presentando el valor de volumen más bajo en comparación a otros meses.

CONCLUSIONES

- La temperatura máxima se presenta en el mes de febrero ($72.32\text{ }^{\circ}\text{F} = 22.4\text{ }^{\circ}\text{C}$), mientras que la temperatura mínima se presenta en el mes de agosto ($63.5\text{ }^{\circ}\text{F} = 17.5\text{ }^{\circ}\text{C}$); la humedad relativa máxima se presenta en el mes de marzo (86%), mientras que la humedad relativa mínima se presenta en los meses de octubre y noviembre (81%); la precipitación máxima se presenta en el mes de marzo (78 mm), mientras que a precipitación mínima en los meses de junio, julio y agosto (4 mm); la velocidad del viento máxima se presenta en el mes de agosto (13.6 kph), mientras que la velocidad del viento mínima se presenta en los meses de febrero y marzo (11 kph); la radiación solar máxima se presenta en el mes de noviembre (6.9 kWh), mientras que la radiación solar mínima se presenta en el mes de junio (13.1 kWh).
- El cálculo de la evapotranspiración utilizando el método FAO Penman reportó, que el volumen máximo de riego suministrado se presenta en el mes de mayo, con un total de $975.59\text{ m}^3/\text{ha}$, mientras que el valor mínimo de riego se encuentra en el mes de enero con un total de $278.12\text{ m}^3/\text{ha}$. Por el método tradicional la proporción de agua que requiere el cultivo de frijol canario entre los meses de marzo a julio es de $4000\text{ m}^3/\text{ha}$, mientras que por el método FAO Penman se requiere $3408.35\text{ m}^3/\text{ha}$, ahorrando $591.65\text{ m}^3/\text{ha}$.
- La arquitectura de control propuesta es un sistema realimentado en las electroválvulas a través de un sistema de control automatizado que actúa de acuerdo con la información proporcionada por los sensores instalados en el terreno.
- El suministro de agua en el riego de frijol canario mediante un sistema automatizado basado en el método FAO Penman evaluado durante 5 meses consecutivos, presenta el mayor rendimiento iniciando en el mes de marzo con un valor de $3408.35\text{ m}^3/\text{ha}$, y el menor rendimiento se presenta iniciando en el mes de noviembre con un valor de $4648.62\text{ m}^3/\text{ha}$.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un estudio evaluando otros cereales para determinar la correlación de las diferentes condiciones climáticas con respecto al rendimiento en el riego de los mismos, así se identificaría el factor climático más influyente en el crecimiento de los mismos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, E., & León, D. (2015). *Prototipo de control para un cultivo de tomate cherry en un invernadero*. [Tesis final de grado], Universidad Católica de Colombia.
- Agromania. (5 de Diciembre de 2019). *Agromania*. Obtenido de <http://agromania.pe/?p=274>
- Bustamante, J. (2016). *Curso PLC y programación: todo sobre PLC*. Seattle: CreateSpace Independent Pub.
- Bustos, A. (2019). *Diseño y control domótico de un sistema de riego automatico para un huerto urbano en el hogar*. [Tesis de maestria], Universidad Oberta de Catalunya.
- Cañón, D., & Cifuentes, E. L. (2018). *Prototipo de un sistema automatizado de riego para jardines*. [Tesis final de grado], Fundación Universitaria Los Libertadores.
- Chenal, S. A., & y otros. (2016). *Curva de crecimiento de frijol*. [Proyecto de fin de carrera, Universidad de San Carlos de Guatemala], Repositorio Institucional USAC.
- Cruz, D., & Y otros. (3 de diciembre de 2021). *Dose of irrigation and coefficient of the culture (kc) in the production of bean (Phaseolus vulgaris L.) in Lima, Perú*. Obtenido de Revista Ingeniería UC, ISSN: <https://www.revistas.uc.edu.ve/index.php/revinguc/article/view/44>
- Escalante, J., & Y otros. (2001). *Producción de frijol, en dos épocas de siembra: su relación con la evapotranspiración, unidades de calor y radiación solar en clima cálido*. Obtenido de Terra Latinoamericana: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57319403>
- Escalas, G. (2015). *Diseño y desarrollo de un prototipo de riego automatico controlado con Raspberry Pi y Arduino*. [Tesis final de grado], Universidad Politécnica de Catalunya.
- Espinoza Montesinos, E. A. (2009). *Evaluacion de 16 genotipos seleccionados en dos densidades de siembra de frijol canario cv. centenario(Phaseolus Vulgaris L.) por su calidad y rendimiento en condiciones de costa central*. [Tesis de doctorado], Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Espinoza, E. (2016). *Adaptación al cambio climático del cultivo de quinua*

- (*Chenopodium quinoa Willd*) en los Andes del Perú. [Tesis de doctorado], Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2006). *Evapotranspiración de cultivo, guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/009/x0490s/x0490s00.htm>
- Gamba, N. (2015). *Sistema automatico remoto para el cuidado de cultivos cereales(frijol y arveja)*. [Tesis de pregrado], Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Lata, L. (2015). *Determinación de la curva de absorción de nutrientes en cuatro etapas fenológicas del cultivo de fréjol Phaseolus vulgaris L.* [Trabajo de titulación], Universidad Técnica de Machala.
- Ministerio de Agricultura y Riego. MINAGRI. (2019). *Requerimientos Agroclimáticos del cultivo de Frijol Grano Seco*. Obtenido de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/419899/ficha-tecnica-06-cultivo-frijol.pdf>
- Pastor-Corrales, M., & F. Schwartz, H. (1994). *Problemas de producción del Frijol en los Trópicos*. Cali, Colombia: Segunda Edición.
- Salinas, R. M. (2019). *Diseño de un prototipo de sistema automatizado con arduino para riego en el cultivo de fresas*. [Tesis final de grado], Universidad de Guayaquil.
- Universidad Nacional del Nordeste. (2013). *Germinación de semillas*. Obtenido de <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/GuiadeestudioGerminacion.pdf>
- Valladolid , A. (2019). *El cultivo del frijol (Phaseolus vulgaris L.) en la costa del Perú*. Obtenido de Instituto Nacional de Investigación Agraria: <http://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/860>

ANEXOS

Anexo 1: Factor de cultivo (Kc)

Cultivo	Humedad Viento (m/seg)	RH min > 70%		RH min < 20%	
		0 - 5	5 - 8	0 - 5	5 - 8
<u>Fase de Desarrollo</u>					
Cultivos extensivos	3	0.95	0.95	1.10	1.05
Cebada	3	1.5	1.1	1.15	1.2
	4	0.25	0.25	0.2	0.2
Frijoles verdes	3	0.95	0.95	1.0	1.05
	4	0.85	0.85	0.9	0.9
Frijoles secos	3	1.05	1.1	1.15	1.2
	4	0.3	0.3	0.25	0.25
Betarraga	3	1.0	1.0	1.05	1.1
	4	0.9	0.9	0.95	1.0
Zanahoria	3	1.0	1.05	1.1	1.15
	4	0.7	0.75	0.8	0.85
Apio	3	1.0	1.05	1.1	1.15
	4	0.9	0.95	1.0	1.05
Maíz choclo	3	1.05	1.1	1.15	1.2
	4	0.95	1.0	1.05	1.1
Maíz (grano)	3	1.05	1.1	1.15	1.2
	4	0.55	0.55	0.6	0.6
Algodón	3	1.05	1.15	1.2	1.25
	4	0.65	0.65	0.65	0.7
Papino	3	0.9	0.9	0.95	1.0
	4	0.7	0.7	0.75	0.8
Lentejas	3	1.05	1.1	1.15	1.05
	4	0.3	0.3	0.25	0.25
Lechuga	3	0.95	0.95	1.0	1.05
	4	0.9	0.9	0.9	1.0

Cultivos	Humedad Viento (m/seg)	RH min > 70%		RH min < 20%	
		0 - 5	5 - 8	0 - 5	5 - 8
Melones	3	0.95	0.95	1.0	1.5
	4	0.65	0.65	0.75	0.75
Avena	3	1.05	1.1	1.15	1.2
	4	0.25	0.25	0.2	0.2
Cebollas de cabeza	3	0.95	0.95	1.05	1.1
	4	0.75	0.75	0.8	0.85
Cebollas verdes	3	0.95	0.95	1.0	1.05
	4	0.95	0.95	1.0	1.05
Maní	3	0.95	1.0	1.05	1.1
	4	0.55	0.55	0.6	0.6
Pimientos frescos	3	0.95	1.0	1.05	1.1
	4	0.8	0.85	0.85	0.9
Papa	3	1.05	1.1	1.15	1.2
	4	0.7	0.7	0.75	0.75
Rabanito	3	0.8	0.8	0.85	0.9
	4	0.75	0.75	0.8	0.85
Sorgo	3	1.0	1.05	1.1	1.15
	4	0.5	0.5	0.55	0.55
Soya	3	1.0	1.05	1.1	1.15
	4	0.45	0.45	0.45	0.45
Espinacas	3	0.95	0.95	1.0	1.05
	4	0.9	0.9	0.95	1.0
Zapallo	3	0.9	0.9	0.95	1.0
	4	0.7	0.7	0.75	0.8
Tomate	3	1.05	1.1	1.2	1.25
	4	0.6	0.6	0.65	0.65
Trigo	3	1.05	1.1	1.15	1.2
	4	0.25	0.25	0.6	0.2

Anexo 2: Tabla del factor de evapotranspiración potencial

LAT. SUR	M E S E S											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1	2,788	2,117	2,354	2,197	2,137	1,990	2,091	2,216	2,256	2,358	2,254	2,285
2	2,371	2,136	2,357	2,182	2,108	1,956	2,050	2,194	2,251	2,372	2,263	2,301
3	2,353	2,154	2,360	2,167	2,079	1,922	2,026	2,172	2,246	2,386	2,290	2,337
4	2,385	2,172	2,362	2,151	2,050	1,888	1,993	2,150	2,240	2,398	2,318	2,372
5	2,416	2,189	2,363	2,134	2,020	1,854	1,960	2,126	2,234	2,411	2,345	2,407
6	2,447	2,209	2,363	2,117	1,980	1,820	1,926	2,103	2,226	2,422	2,371	2,442
7	2,478	2,221	2,363	2,099	1,959	1,789	1,893	2,078	2,218	2,433	2,397	2,476
8	2,508	2,237	2,362	2,081	1,927	1,750	1,858	2,054	2,210	2,443	2,423	2,510
9	2,538	2,251	2,360	2,062	1,896	1,715	1,824	2,028	2,201	2,453	2,448	2,544
10	2,567	2,265	2,357	2,043	1,864	1,679	1,789	2,003	2,191	2,462	2,473	2,577
11	2,596	2,279	2,354	2,023	1,832	1,644	1,754	1,975	2,180	2,470	2,497	2,610
12	2,625	2,292	2,350	2,002	1,799	1,608	1,719	1,990	2,169	2,477	2,520	2,643
13	2,652	2,305	2,343	1,981	1,767	1,572	1,684	1,922	2,157	2,484	2,543	2,679
14	2,680	2,317	2,340	1,959	1,735	1,536	1,648	1,895	2,144	2,490	2,566	2,706
15	2,707	2,328	2,334	2,937	1,700	1,500	1,612	1,867	2,131	2,496	2,588	2,738
16	2,734	2,339	2,317	1,914	1,666	1,464	1,576	1,838	2,117	2,500	2,610	2,769
17	2,760	2,349	2,319	1,891	1,632	1,427	1,540	1,809	2,103	2,504	2,631	2,799
18	2,785	2,359	2,311	1,867	1,598	1,391	1,504	1,780	2,088	2,508	2,651	2,830
19	2,811	2,368	2,302	1,843	1,564	1,354	1,467	1,750	2,072	2,510	2,671	2,859

Anexo 3: Ambiente simulado de la ciudad de Trujillo

- Ingreso del mes

INGRESE EL MES INICAL DEL CULTIVO	Mes	Temperatura (F°)	Humedad (%)	Precipitación (mm)	Velocidad del viento (kph)	Radiación solar (kWh)	MF
3	Marzo	71.96	86	78	11	6	2.362
	Abril	69.62	84	36	11.8	6	2.081
	Mayo	67.28	83	9	12.7	5.9	1.927
	Junio	65.3	83	4	13.1	5.8	1.75
	Julio	64.22	83	4	13.4	6.1	1.858

$$Eto = T(^{\circ}F) \times CH \times MF \text{ de donde } CH = 0.166 \sqrt{100 - HR}$$

	CH	Eto x mes (mmes ⁻¹)	Eto x días (mm día ⁻¹)
Marzo	0.62	105.57	3.4
Abril	0.66	96.20	3.2
Mayo	0.68	88.74	2.9
Junio	0.68	78.21	2.6
Julio	0.68	81.67	2.6

- Cálculo del Etc

Fases	Mes	Eto (mm)	Kc	Etc (mm)
Fase inicial	Marzo	3.4	0.5	1.70
Fase de desarrollo	Abril	3.2	0.8	2.57
	Mayo	2.9		2.29
Fase de floración	Mayo	2.9	1.05	3.01
	Junio	2.6		2.74
Fase de recolección	Junio	2.6	0.9	2.35
	Julio	2.6		2.37

- **Cálculo del volumen de agua suministrada**

	Marzo	Abril	Mayo		Junio		Julio
	Fase Inicial	Fase de desarrollo	Fase de desarrollo	Fase de floración	Fase de floración	Fase de recolección	Fase de recolección
Lamina neta (mm)	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
ETc	1.70	2.57	2.29	3.01	2.74	2.35	2.37
Frecuencia	3.2	2.1	2.4	1.8	2.0	2.3	2.3
Días	15	30	5	26	14	16	19
Días de riego	4.7	14.3	2.1	14.5	7.1	7.0	8.3
Horas de riego	6.62	19.95	2.97	20.26	9.94	9.73	11.68
Volumen de riego	39.73	119.72	17.81	121.56	59.62	58.40	70.08
Volumen de riego/ha	278.12	838.01	124.68	850.91	417.31	408.80	490.53

Volumen total de agua suministrada	3408.35
------------------------------------	---------



Tiempo de riego (h)	Lamina bruta (mm)
4.91	6

Hectareas (ha)
1

Dimension del cultivo (m)
0.7 x 0.7

Distancia entre surcos (m)
0.3 x 0.3

Área de cultivo x hectarea (m)
7000.00

