

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias de la Vida

Diseño de las necesidades hídricas del maíz y frejol de palo, mediante el uso de un bloque de lisímetros de drenaje e instrumentos de medición de la humedad del suelo.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniera Agrícola y Biológica

Presentado por:

Gladys Mariuxi Vivar Aviles

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mi familia y amigos, quienes fueron un pilar fundamental para mi superación profesional.

A mi mamá Carmen, por su cariño y consejos que me permitieron mantener la visión de la profesional que quiero llegar a ser.

A mi abuelita Gladys, por su amor, consejos y confianza en que puedo llegar lejos y cumplir mis metas. **A mi tía Johana**, por su amor y consideración en mis estudios.

A Cristhian, por ese gran amor de hermano, por los consejos, por esa motivación para alcanzar mis metas y ser mi apoyo para continuar con mis estudios y proyectos. Espero de todo corazón poder retribuirlo pronto.

A David Arias, quien ha sido mi apoyo, soporte y compañero durante toda mi carrera Universitaria y en lo personal, merece gran parte de los logros que obtenga en mi vida profesional.

A Carlos A., Mercedes A. y Angela G., por ese cariño, respeto y apoyo que siempre me han brindado desde el día en que los conocí.

AGRADECIMIENTOS

A mi hermano Cristhian, quien cumplió un rol importante en mi vida, siendo ese modelo a seguir para convertirme en una profesional y un gran ser humano.

A David Arias, por su infinito apoyo, comprensión, cariño, amor y compañía. Por brindarme oportunidades para poder adquirir conocimientos y formarme académicamente.

Cristhian y David, muchas gracias por ser quienes nunca me dejaron sola y siempre estuvieron apoyándome e impulsándome a conseguir mis metas.

A Jorge Marshall, por ser ese gran amigo, darme ánimos y confiar siempre en lo que me he propuesto.

A los amigos que hice a lo largo de mi carrera universitaria, Sara Nieto y Geovanny Morán, los cuales de una u otra manera contribuyeron en mi formación y aprendizaje.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Gladys Mariuxi Vivar Aviles y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Autor

EVALUADORES

.....
Nombre del Profesor

PhD. María Isabelita Jiménez Feijoo

.....
Nombre del Profesor

MSc. Jaime Luis Proaño Saraguro

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo determinar los requerimientos hídricos del cultivo de maíz y frejol de palo, mediante el uso de un bloque de lisímetros de drenaje, el cual es un reservorio de suelo con su parte superior al límite de la superficie del terreno manteniendo las interacciones agua–suelo–planta como si estuviese en un monocultivo; mediante la diferencia del agua ingresada y drenada, se pudo estimar la ETc real en el área de estudio. Se empezó con la calibración del bloque, la cual tuvo como objetivo conocer las propiedades físicas de ese suelo y humedad presente, luego se realizó la siembra de los cultivos analizados, para empezar la planificación del riego, calculando el tiempo que necesita estar la bomba encendida con un riego por goteo para devolver al suelo la lámina de agua que se perdió por evapotranspiración; con los datos obtenidos en cada riego se calculó los valores de Kc inicial de los cultivos. Finalmente, se obtuvo que el consumo de agua del frejol fue de 20.60mm, con una duración de la etapa fenológica inicial de 20 días y un valor Kc de 0.71, y del maíz de 23.81mm con una duración de 30 días y Kc de 0.78, encontrándose en la fase fenológica V3 y V5 respectivamente. El bloque de lisímetros de drenaje es una alternativa económica para conocer la evapotranspiración en varias regiones, permitiendo analizar varios cultivos en diferentes periodos de tiempo, además de generar un ahorro de agua en la agricultura.

Palabras Clave: Lisímetros de drenaje, Kc, ETc, Maíz, Frejol de palo.

ABSTRACT

The objective of this work was to determine the water requirements of corn and pole bean cultivation, through the use of a drainage lysimeter block, which is a soil reservoir with its upper part at the limit of the land surface, maintaining the water-soil-plant interactions as if it were in a monoculture; By means of the difference of the water entered and drained, it was possible to estimate the real ET_c in the study area. It began with the calibration of the block, which had the objective of knowing the physical properties of that soil and present humidity, then the sowing of the analyzed crops was carried out, to later start the irrigation planning, calculating the time that the pump needs to be lit with drip irrigation to return to the soil the sheet of water that was lost through evapotranspiration; With the data obtained in each irrigation, the initial K_c values of the crops were calculated. Finally, it was obtained that the water consumption of the beans was 20.60mm, with a duration of the initial phenological stage of 20 days and a K_c value of 0.71, and of the corn of 23.81mm with a duration of 30 days and a K_c of 0.78, being in the phenological phase V3 and V5 respectively. The drainage lysimeter block is an economic alternative to know the evapotranspiration in several regions, allowing the analysis of several crops in different periods of time, in addition to generating water savings in agriculture.

Keywords: *Drainage Lysimeter, K_c , ET_c , Corn, Beans.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema.....	2
1.2 Justificación del problema.....	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 Lisímetro.....	3
1.4.2 Características físicas del suelo	4
1.4.3 Instrumentos usados en el suelo.....	6
1.4.4 Calibración	7
1.4.5 Coeficiente de cultivo Kc	7
1.4.6 Factores climáticos.....	7
1.4.7 Evapotranspiración del cultivo de referencia	8
1.4.8 Cultivo de maíz (<i>Zea mays</i>).....	8
1.4.9 Frejol de palo (<i>Cajanus Cajan</i>).....	10

CAPÍTULO 2	12
2. Metodología	12
2.1 Área de estudio.....	13
2.1.1 Ubicación.....	13
2.1.2 Características edafoclimáticas.....	13
2.2 Materiales y equipos	14
2.3 Bloque de lisímetros de drenaje.....	14
2.4 Calibración del bloque de lisímetros de drenaje	15
2.4.1 Evaluación de pruebas físicas del suelo.....	15
2.4.2 Obtención del contenido de humedad del suelo.....	18
2.4.3 Cálculo de la lámina de riego a aplicar.....	18
2.4.4 Cálculo del volumen de agua a CC	19
2.5 Instalación de tensiómetros	20
2.6 Siembra y diagnóstico de las variables agronómicas	20
2.6.1 Siembra	21
2.6.2 Manejo del cultivo.....	22
2.6.3 Unidades de muestreo	22
2.6.4 Variables agronómicas.....	23
2.7 Requerimiento hídrico del cultivo en la etapa inicial	24
2.7.1 Cálculo de ETo.....	25
2.7.2 Cálculo de ETc.....	27
2.7.3 Precipitación horaria de riego.....	27
2.7.4 Cálculo de las horas de riego	27
2.7.5 Cálculo del coeficiente Kc	28
2.7.6 Curva Kc.....	30
CAPÍTULO 3	32

3.	Resultados Y ANÁLISIS	32
3.1	Evaluación de pruebas físicas	32
3.2	Obtención del contenido de humedad inicial del suelo	34
3.3	Variables agronómicas	35
3.4	Requerimiento hídrico del cultivo	38
CAPÍTULO 4		42
4.	Conclusiones Y Recomendaciones	42
4.1	Conclusiones	42
4.2	Recomendaciones	43
5.	BIBLIOGRAFÍA.....	44
6.	APÉNDICES	47

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ET _c	Evapotranspiración del cultivo
ET _o	Evapotranspiración del cultivo de referencia
K _c	Coeficiente del cultivo
K _c ajust	Coeficiente de cultivo ajustado

SIMBOLOGÍA

mm	milímetro
cm	centímetro
cb	centíbar
h	hora
L	litro
T	Temperatura
CC	Capacidad de campo
PMP	Punto de marchitez permanente

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Lisímetro de drenaje ubicado en ESPOL	4
Figura 2.1 Metodología para diseño del requerimiento hídrico.....	12
Figura 2.2 Modelado 3D del bloque de lisímetro de drenaje	15
Figura 2.3 Penetrómetro manual utilizado en el lisímetro de drenaje.....	17
Figura 2.4 Infiltrómetro Turf Tec utilizado en el lisímetro de drenaje	18
Figura 2.5 Tensiómetros colocados en cada una de las capas del lisímetro.....	20
Figura 2.6 Imagen aérea de la unidad experimental	21
Figura 2.7 Unidades de muestreo de la unidad experimental.....	23
Figura 2.8 Medidor ubicado al costado del lisímetro 4	27
Figura 2.9 Figura 29. del Manual de la FAO.....	29
Figura 2.10 Figura 30b. del Manual de la FAO.....	29
Figura 3.1 Gráfico de resistencia Vs profundidad.....	33
Figura 3.2 Gráfica de comparación de ETo	39
Figura 3.3 Curva Kc de maíz.....	41
Figura 3.4 Curva Kc de frejol de palo	41
Figura 6.1 Datos del riego del Lisímetro 2.....	47
Figura 6.2 Datos del riego del Lisímetro 3.....	47
Figura 6.3 Datos del riego del Lisímetro 4.....	47
Figura 6.4 Datos del riego del Lisímetro 5.....	48
Figura 6.5 Datos del riego del Lisímetro 6.....	48
Figura 6.6 Datos del riego del Lisímetro 7.....	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Cuadro de clasificación de las partículas minerales del suelo	5
Tabla 1.2 Rangos de las lecturas del tensiómetro	6
Tabla 1.3 Estadíos vegetativos del cultivo de maíz	9
Tabla 1.4 Etapas fenológicas del cultivo de maíz	10
Tabla 1.5 Estadíos vegetativos del frejol de palo	10
Tabla 1.6 Fases fenológicas del frejol de palo	11
Tabla 2.1 Ubicación geográfica	13
Tabla 2.2 Características edafoclimáticas del área de estudio	13
Tabla 2.3 Características de cada lisímetro	15
Tabla 2.4 Características del bloque de lisímetros sembrados	21
Tabla 2.5 Características de la unidad experimental	22
Tabla 2.6 Detalles del manejo del cultivo	22
Tabla 2.7 Duración de las etapas fenológicas teóricas	31
Tabla 3.1 Propiedades físicas promedio del bloque de lisímetros	32
Tabla 3.2 Contenido de humedad a CC y PMP	34
Tabla 3.3 Volumen de agua a aplicar en el primer riego	34
Tabla 3.4 Porcentaje de germinación de frejol de palo	35
Tabla 3.5 Porcentaje de germinación del maíz a los 8 días	35
Tabla 3.6 Porcentaje de germinación del maíz a los 30 días	36
Tabla 3.7 Variables agronómicas del frejol en la unidad experimental	36
Tabla 3.8 Variables agronómicas del frejol en el lisímetro	37
Tabla 3.9 Variables agronómicas del maíz en la unidad experimental	37
Tabla 3.10 Variables agronómicas del maíz en el lisímetro	38
Tabla 3.11 Comparación de ETo	39
Tabla 3.12 Coeficiente único del cultivo	40
Tabla 3.13 Kc teórico y ajustado de cultivo de maíz	40
Tabla 3.14 Kc teórico y ajustado del cultivo de frejol	41

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En la planificación de un proyecto de riego y drenaje, es indispensable conocer la ETc a implementar, la cual va a depender de la región y sus condiciones edafoclimáticas, lo que permite brindar al cultivo el agua necesaria para realizar sus funciones de acuerdo con su etapa fenológica, logrando una adaptación en la región dónde sea establecido dicho cultivo, se evite el exceso de riego y desperdicio de agua o, por el contrario, deficiencias hídricas que se traducen en bajos rendimientos y estrés hídrico.

Alrededor del 70% del agua del mundo es utilizada para la agricultura, su escasez es cada vez más atribuida a la degradación ambiental, por lo tanto, el agua es la principal limitante en la producción de alimentos; constantemente se está buscando alternativas y metodologías adecuadas para optimizarla, logrando aumentar el rendimiento del cultivo; la forma más sencilla y directa de determinar los requerimientos hídricos de los cultivos es mediante el uso de un bloque de lisímetros de drenaje.

Un lisímetro de drenaje es un reservorio de suelo con su parte superior al nivel de la superficie del terreno, el cual debe simular las condiciones naturales de ese suelo, permitiendo controlar y regular las interacciones agua-suelo-planta, lo que facilita la obtención de datos experimentales como velocidad de infiltración, compactación, contenido de humedad, conteo del agua ingresada y salida del reservorio de suelo, datos que permiten conocer los valores reales de la evapotranspiración de un cultivo en una región específica, de tal manera, que ya no se utilicen datos referenciales de otra localidad o valores obtenidos de fórmulas empíricas que no arrojan valores certeros, realizando un establecimiento y un correcto ajuste de los intervalos y cantidad de riego en base al agua drenada que no es absorbida por el cultivo (Grajales, 2010).

La ESPOL en cooperación con la Unión Europea y la Escuela Nacional de Irrigación (ENIP) del Ministerio de Agricultura y Ganadería, forman parte de las principales entidades interesadas en dar a conocer las demandas hídricas que tienen los diferentes cultivos en Ecuador, permitiendo un ahorro del recurso hídrico, mediante la construcción y calibración de un bloque de lisímetros de drenaje ubicado en ESPOL (ESPOL, 2021).

1.1 Descripción del problema

La agricultura ocupa alrededor del 70% del agua disponible en el mundo y esto se debe a los diferentes requerimientos hídricos de los cultivos. La demanda de alimentos cada vez va en aumento, ocasionando que los productores aumenten la superficie sembrada, diversifiquen cultivos, se preocupen más por el suministro de agua y la realización un correcto plan de riego.

El acceso al agua se va reduciendo constantemente, obligando a los productores a buscar y probar diferentes metodologías que permitan conocer los requerimientos hídricos de un cultivo en una determinada zona y optimizar este recurso, obteniendo un alto rendimiento en su cultivo.

Actualmente, la principal causa del bajo rendimiento de los cultivos se debe a la falta de agua, el productor no tiene un acceso permanente a ella o por el contrario, su plan de riego resulta ineficiente por el desconocimiento del requerimiento hídrico del cultivo en determinada región, ya que muchas veces se toman datos referenciales de otras zonas o regiones, brindando intervalos y cantidad de agua aplicada no correspondiente con los requerimientos hídricos del cultivo, de acuerdo con la etapa fenológica en la que se encuentra.

1.2 Justificación del problema

Para los agricultores, es indispensable conocer la tasa de evapotranspiración de los cultivos en una determinada zona, de acuerdo con su etapa fenológica, puesto que, los rendimientos se han visto limitados por el inadecuado suministro de agua, su gran mayoría se pierde por infiltración y no es aprovechada por el cultivo, resultando en pérdidas económicas y problemas fitosanitarios por el estrés hídrico ocasionado. El presente proyecto pretende establecer un diseño para conocer la lámina de agua que se debe reponer en cada riego, la cual se pierde por ETc en cada etapa fenológica, mediante el uso de un bloque de lisímetros de drenaje, logrando realizar las correcciones correspondientes de acuerdo con la cantidad de agua a aplicar y los intervalos de riego, brindando al cultivo el agua necesaria para realizar sus funciones, lo que se reflejará en buenos rendimientos en la producción y mayores ingresos económicos a los productores, además, este diseño permitirá la conservación del agua ocupada en la agricultura evitando desperdicios innecesarios de la misma.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Determinar los requerimientos hídricos del cultivo de maíz (*Zea mays*) y frejol de palo (*Cajanus cajan*) en la etapa fenológica inicial, mediante el uso de un bloque de lisímetros de drenaje e instrumentos de medición de la humedad del suelo.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Calibrar el bloque de lisímetros de drenaje mediante pruebas físicas de suelo y el método gravimétrico.
2. Establecer el cultivo de maíz y frejol de palo para la obtención de datos del porcentaje de germinación y variables agronómicas.
3. Determinar el valor de Kc inicial e intervalos de riego de los cultivos analizados.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Lisímetro

Es un método para obtener datos de la evapotranspiración del cultivo, su objetivo es simular las condiciones naturales en las que se encuentra un suelo, es decir, manteniendo la relación que existe entre él, la atmósfera y la vegetación, se trata de un contenedor de suelo con su parte superior a nivel con la superficie del terreno, el cual sirve como referencia para obtener datos experimentales del suelo y cultivo como infiltración, compactación, escorrentía, evapotranspiración, drenaje, etc. y poder extrapolarlos a grandes extensiones de terreno (Ocampo, 2012).

El suelo contenido en el lisímetro debe tener las mismas condiciones del que está fuera de este y debe estar rodeado por el cultivo que se esté analizando dentro de él (Machaca, 2011). Los tipos de lisímetros más utilizados son:

- Lisímetro de pesada (LP), el cual tiene el trabajo de calcular cuál es el peso de agua que se pierde o es consumida por el cultivo, entre intervalos de riego.

- Lisímetros de drenaje (LD), esta estima la cantidad de agua que fue consumida, mediante la diferencia que existe entre el agua aplicada en el riego y el agua drenada.



Figura 1.1 Lisímetro de drenaje ubicado en ESPOL

En el cantón Riobamba de la provincia de Chimborazo, Ecuador, la ESPOCH realizó el proyecto de un “DISEÑO, INSTALACIÓN Y CALIBRACIÓN DE BLOQUE DE SIETE LISIMETROS DE DRENAJE PARA AJUSTE DE COEFICIENTE DE CULTIVOS (K_c).”, el cual permite determinar las necesidades hídricas de diferentes cultivos de la zona en sus diferentes etapas fenológicas, logrando generar datos reales sobre ET_c en esa región en específico y realizar un ahorro del agua en la producción agrícola, permitiendo duplicar esta metodología en diferentes regiones del país y conocer la ET_c en cada zona de interés (Salazar, 2020).

1.4.2 Características físicas del suelo

La importancia del uso de lisímetros radica en que este debe representar las condiciones *in situ* del área a experimentar, por lo cual se debe considerar varias características del suelo, los cuales pueden influir en los resultados obtenidos.

1.4.2.1 Textura

Se denomina textura al contenido de partículas minerales del suelo, las cuales pueden ser una proporción de arena, limo y arcilla. En la Tabla 1.1 se observan la clasificación de las partículas minerales del suelo y sus dimensiones de acuerdo con la USDA e IUSS (Gabriels, 2011).

Tabla 1.1 Cuadro de clasificación de las partículas minerales del suelo (Gabriels, 2011)

		USDA	IUSS
		µm	µm
		(micrómetros)	(micrómetros)
Arena	Muy gruesa	2000-1000	-
	Gruesa	1000-500	2000-200
	Media	500-250	-
	Fina	250-100	20-200
	Muy fina	100-50	-
Limo		50-2	20-2
Arcilla		< 2	< 2

1.4.2.2 Compactación

La compactación se refiere a la reducción de volumen que experimenta el suelo por acción de fuerzas externas que actúan sobre él, perdiendo porosidad y estructura. Según (González, 2009) “La compactabilidad del suelo es la máxima densidad de volumen a la cual este puede ser comprimido por una cantidad de energía dada.”

1.4.2.3 Velocidad de infiltración

La infiltración es el proceso en el cual el agua se mueve desde la superficie hacia la interior del suelo, su velocidad depende de la textura que este posea, además de otros parámetros físicos como densidad aparente, porosidad, compactación, etc., es variable en tiempo y espacio. La velocidad de infiltración se ve afectada por el contenido de humedad que posea el suelo en ese momento, en un suelo seco va a ser mayor, debido a que se transporta a un lugar de menor potencial, lo que no pasa con un suelo húmedo o saturado (Ávila, 2021).

1.4.2.4 Densidad aparente

Su valor depende de la estructura del suelo y se expresa como la relación entre la masa del suelo seco por unidad de volumen total ocupado

por esa masa, se expresa en g/cm^3 . Refleja el contenido de poros que posee un suelo, indicando si está o no compactado.

1.4.3 Instrumentos usados en el suelo

1.4.3.1 Penetrómetro manual

Este instrumento detecta los cambios de densidad aparente a diferentes profundidades del suelo, lo cual se produce por la compactación (Denoia, 2008). El instrumento mide la resistencia que este ejerce para no ser perturbado, de esta manera, mientras mayor sea esta resistencia, más compacto se encuentra el suelo.

1.4.3.2 Infiltrómetro de doble anillo

Este instrumento se compone de dos anillos, uno interno y otro externo, una escala en cm y pulgadas, además, penetra el suelo 15cm. Su principio se basa en saturar una porción de suelo limitada por estos anillos e ir midiendo el descenso de la boya mientras se va filtrando el agua en el suelo. El tiempo que tarde en filtrar el agua dependerá de las condiciones del suelo, como textura, contenido de humedad y compactación, el instrumento está diseñado para medir la velocidad de infiltración en un lapso de 15 minutos (Huaman, 2016).

1.4.3.3 Tensiómetro

Permite conocer la tensión que ejercen las raíces cuando extraen agua de los macro y microporos del suelo, la lectura es igual o cercana a cero cuando hay mayor contenido de agua, por el contrario, son mayores mientras el suelo va perdiendo agua, puesto que, se necesita más fuerza para extraer el agua de los microporos. La tensión se mide en centibar (cb) o kilopascales (Kp) (Salgado, 1990).

Tabla 1.2 Rangos de las lecturas del tensiómetro

Valor	Descripción
0 – 10	Indica saturación del suelo
10 – 20	Capacidad de campo
30 – 60	Humedad útil (escasa para riego por goteo)
> 60	Déficit de agua

1.4.4 Calibración

Antes de realizar la calibración del bloque de lisímetros es importante tener datos de las características físicas del suelo. La metodología utilizada en ESPOCH (Salazar, 2020) para la calibración del bloque de lisímetro fue la siguiente:

❖ Contenido de humedad por capa

Determinaron el contenido de humedad de cada una de las capas del suelo contenidas en los 7 lisímetros, siendo estas de 0-20cm, 20-40cm y de 40-60cm, además de usar bloques de yeso y el método gravimétrico para conocer la humedad actual del suelo.

❖ Volumen de agua a capacidad de campo (CC)

Para conocer el volumen de agua necesario para llevar al suelo a capacidad de campo, se realizó una sumatoria de los contenidos de agua de cada capa, determinando la cantidad total que necesita cada lisímetro para llegar a esa capacidad.

❖ Agua drenada

Una vez que se haya llegado al volumen de agua que necesita el suelo para estar a CC, se aplicó un sobre riego del 25% del VCC para obligar al lisímetro a drenar toda el agua adicional.

1.4.5 Coeficiente de cultivo Kc

Este coeficiente se usa para relacionar la evapotranspiración del cultivo de interés con la evapotranspiración del cultivo de referencia (pasto), cambia de acuerdo con la etapa fenológica de la planta, puesto que, de eso depende si evapotranspira más o menos, generalmente el coeficiente es máximo 1, aunque puede alcanzar valores de hasta 1.2 en la etapa media del cultivo, esto se debe a factores como mayor altura de la planta o menor espaciamiento entre ellas (Briceño, 2012).

1.4.6 Factores climáticos

1.4.6.1 Evaporación

La evaporación del agua es un proceso físico y continuo, donde a una determinada temperatura el agua cambia de estado, pasando de líquido a

vapor (Manzur, 2015). En campo se utilizan tinajas de evaporación, las cuales indican la lámina de agua que se pierde durante un periodo y se mide en mm/día.

1.4.6.2 Temperatura

Es una cantidad física que define que tan fría o caliente se encuentra una sustancia. En la agricultura, la temperatura tiene gran importancia, ya que determina la cantidad de agua que se pierde en el sistema suelo-planta, a mayor temperatura mayor será la tasa de evapotranspiración del cultivo.

1.4.6.3 Humedad relativa

Es la cantidad de vapor de agua que se encuentra en el aire, se la mide en porcentaje y se interpreta de la siguiente manera: del 100% del vapor de agua que se necesita para condensarse a una determinada temperatura, el ambiente posee ese % medido. Es importante conocer este factor, puesto que si es alto la planta va a evapotranspirar menos (Briceño, 2012).

1.4.7 Evapotranspiración del cultivo de referencia

Según (González, 2017), el ETo se define como “la velocidad de evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme entre 8 y 15 cm de alto, creciendo activamente, ofreciendo cobertura total y que no tiene déficit de humedad.”

1.4.8 Cultivo de maíz (Zea mays)

En la región costa, en Ecuador, las provincias que poseen la mayor cantidad de suelos en producción de este cereal son: Santa Elena, Guayas y Los Ríos, representando un 39% del total de la superficie nacional.

Sin embargo, debido al constante cambio climático, los periodos de lluvia y sequía se han ido modificando, convirtiendo al riego en uno de los factores limitantes para la producción de este cereal.

1.4.8.1 Riego

En el Centro Experimental de Riego, ubicado en Riobamba se ha demostrado que el riego por goteo es el más eficiente para la producción

de maíz, puesto que, al ser un riego localizado se reduce considerablemente el desperdicio de agua. (Caviedes, 2022).

1.4.8.2 Necesidades hídricas

La Estación Experimental del Valle Inferior en Argentina, la cual se caracteriza por ser una zona árida o semiárida, se encuentra a 4msnm, presentando precipitaciones medias anuales de 408mm, temperaturas medias de 14.1°C, realizó un experimento en donde se utilizaron lisímetros de drenaje para conocer la ETc de maíz, con un sistema de riego por goteo, se lo realizó en la campaña 2014/15 y 2015/16, con un marco de plantación de 0.16m x 0.70m, en este estudio se determinó que las necesidades hídricas del cultivo en todo su ciclo de producción fue de: en la campaña 2014/15 una ETc de 628mm y en la campaña 2015/16 de 580mm (Torretta, 2017).

1.4.8.3 Estadíos vegetativos

Para su desarrollo, el cultivo debe pasar por varias etapas, iniciando en la germinación hasta la floración y formación del fruto.

Tabla 1.3 Estadíos vegetativos del cultivo de maíz (Guzman, 2017)

Estadío	Descripción
VE:	Germinación y emergencia.
V1:	Aparición de la primera hoja luego de la germinación.
V2:	Aparición de la segunda hoja, formando el primer par de hojas luego de la germinación.
V3:	Aparición de la tercera hoja, el ápice aún se encuentra debajo de la superficie del suelo
Vn:	Aparición de la enésima hoja

1.4.8.4 Etapas fenológicas

Las etapas fenológicas del maíz están representadas por los días en los cuales el cultivo presenta determinadas características.

Tabla 1.4 Etapas fenológicas del cultivo de maíz (Guzman, 2017)

Etapas	Descripción
Etapa inicial:	Desde la fecha de siembra hasta la aparición de las primeras hojas verdaderas y el cultivo cubra un 10% de la superficie.
Etapa de desarrollo:	Desde el final de la etapa inicial hasta que el cultivo cubra un 70-80% de la superficie.
Etapa media:	Desde el final de la etapa de desarrollo hasta la maduración del cultivo, donde aumenta el requerimiento hídrico.
Etapa final:	Desde el inicio de la maduración hasta la cosecha, disminuye el requerimiento hídrico.

1.4.9 Frejol de palo (*Cajanus Cajan*)

También denominado guandul, es potencial forraje para la dieta de los animales en época seca y es preferido por su alto contenido de proteína. Este arbusto se adecúa a una gran variedad de suelos, aunque presenta una mejor adaptación y rendimiento en suelos con textura franca y de buen drenaje, además de ser tolerante a la sequía (Mite, 2018).

El frejol de palo es una leguminosa y como tal posee una gran capacidad de fijar Nitrógeno en el suelo, se encuentra dentro de las 8 leguminosas más cultivadas en el mundo y posee el tercer lugar en cuanto al contenido de proteína del 25% en grano seco (Rios, 2016). En la zona costera se lo cultiva mayormente en las provincias de Manabí, Los Ríos y Guayas, la variedad más apetecida para exportación es la del grano blanco.

Tabla 1.5 Estadíos vegetativos del frejol de palo (Fernandez, 1985)

Estadío	Descripción
V0	Germinación
V1	Emergencia
V2	Hojas primarias unifoliadas

V3	Primera y segunda hoja trifoliada
V4	Tercera, cuarta y quinta hoja trifoliada
R5	Floración

Tabla 1.6 Fases fenológicas del frejol de palo (Fernandez, 1985)

Etapas	Descripción
Etapa inicial	Desde la siembra hasta la aparición de la tercera hoja trifoliada
Etapa media	Desde la tercera hoja trifoliada hasta la prefloración
Etapa de desarrollo	Desde la floración hasta la maduración
Etapa final	Desde la maduración hasta la cosecha

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

El presente trabajo se lo realizó en 3 etapas, siguiendo la metodología descrita en la Figura 2.1, la cual tuvo como finalidad cumplir con los objetivos específicos establecidos.

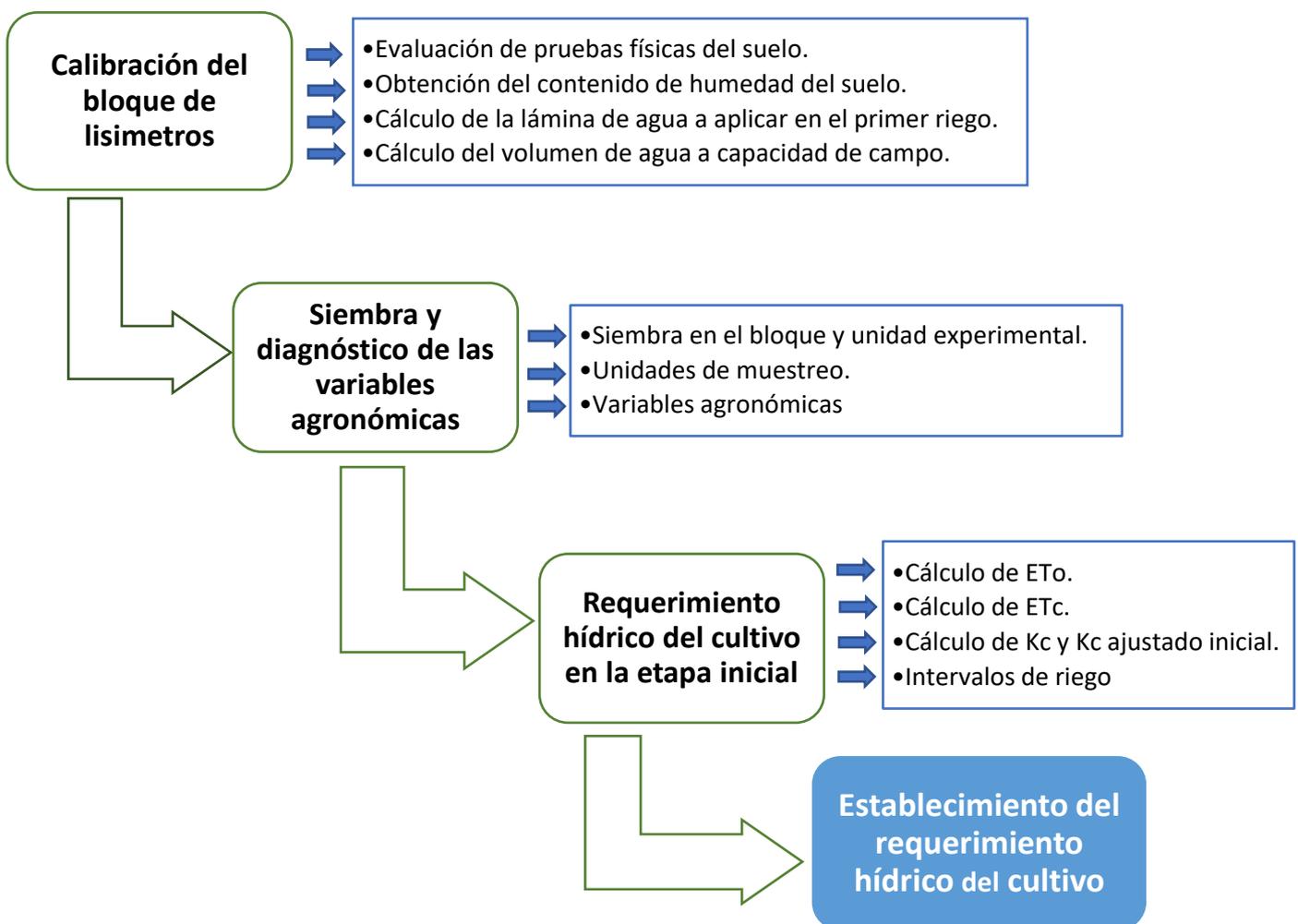


Figura 2.1 Metodología para diseño del requerimiento hídrico

2.1 Área de estudio

2.1.1 Ubicación

El presente proyecto se realizó en la granja experimental GEA perteneciente a la Escuela Superior Politécnica del Litoral, la cual se encuentra ubicada en el campus Gustavo Galindo en el Km 30.5 de la vía perimetral, situado en el cantón Guayaquil, provincia del Guayas, Ecuador.

Tabla 2.1 Ubicación geográfica (Lara, 2016)

Datos Geográficos	
Altitud:	64 msnm
Latitud:	02°08'28" S
Longitud:	79°57'42" O

2.1.2 Características edafoclimáticas

En la Tabla 2.2 se muestra un resumen tanto de las características edáficas como climáticas del área de estudio.

Tabla 2.2 Características edafoclimáticas del área de estudio

Característica	Dato
Textura de suelo:	Franco Arcillo Limoso
Temperatura media (°C):	23.39
Temperatura min (°C):	21.75
Temperatura máx (°C)	21.98
Precipitación anual (mm):	1420
Humedad relativa (%):	83
Velocidad de viento (m/s):	1.31

De acuerdo con la clasificación de Holdrige, el área de estudio se encuentra en una zona de vida de bosque seco tropical.

2.2 Materiales y equipos

Materiales

- Semillas híbridas de maíz Advanta 9139
- Semillas de frejol de palo
- Barreno
- Papel aluminio
- Baldes de 20 L
- Marcador
- Tanque evaporímetro
- Bandeja germinadora
- Sustrato
- Bomba de mochila
- Fertilizantes
- Insecticidas
- Flexómetro
- Rastrillo
- Libreta de campo

Equipos

- Balanza gravimétrica
- Secadora de suelo
- Penetrómetro manual
- Infiltrómetro Turf - Tec
- Tensiómetros
- Medidor de clorofila

2.3 Bloque de lisímetros de drenaje

La Figura 2.2 muestra un modelado del bloque, el cual consiste en 7 lisímetros de drenaje colocados en forma de U, cada uno de ellos contiene 3 capas de suelo a diferentes profundidades, de 0-20cm, 20-40cm y 40-60cm, los cuales fueron colocados de la misma forma en la que estuvo el suelo antes de ser perturbado por la construcción; cada lisímetro contiene una pared de vidrio templado permitiendo observar el crecimiento y desarrollo de las raíces del cultivo de acuerdo con la etapa fenológica en la que se encuentra.

El bloque de lisímetro posee un sistema de riego por goteo, a su costado se encuentra un medidor que permite conocer el volumen en m³ del agua ingresada en cada riego. Además, cuenta con una escalera de ingreso que permite bajar y recolectar el agua drenada que no fue aprovechada por el cultivo de cada una de las llaves.

Tabla 2.3 Características de cada lisímetro

Descripción	Por lisímetro
Tipo de riego:	Goteo
Área (m ²):	4.91
Cintas:	5
Goteros por cintas:	7
Caudal del emisor (L/h):	1.50
Caudal total (L/h):	52.50

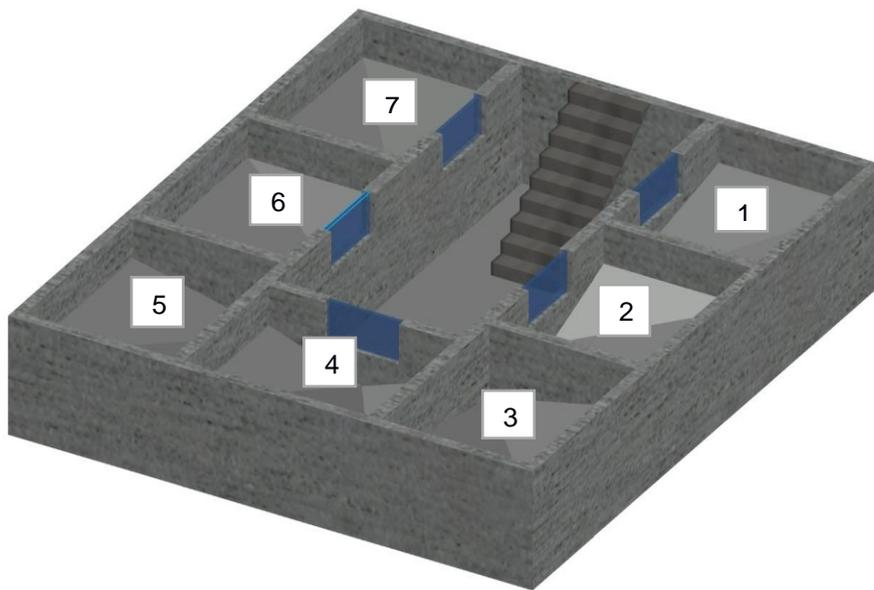


Figura 2.2 Modelado 3D del bloque de lisímetros de drenaje

2.4 Calibración del bloque de lisímetros de drenaje

2.4.1 Evaluación de pruebas físicas del suelo

Una vez realizado la preparación de terreno de cada uno de los lisímetros se evaluaron las pruebas físicas del suelo, las cuales servirán para posteriores cálculos.

❖ **Densidad aparente**

Se determinó la densidad aparente en cada una de las capas de cada lisímetro, se introdujo un tubo PVC en la capa y se secó la muestra de suelo retenida obteniendo la masa del suelo seco, mediante las dimensiones de dicho tubo se calculó su volumen y se procedió a aplicar la siguiente ecuación.

$$da = \frac{\text{masa de suelo seco (Kg)}}{\text{volumen (L)}} \quad (1)$$

Luego se promediaron los valores de las capas para poder obtener un solo valor de densidad aparente por lisímetro.

❖ **Compactación**

Se utilizó un penetrómetro manual (Figura 2.3), el cual mide la resistencia del suelo a ser disturbado, se utilizó el cono más grande con un diámetro de 2.5 cm, debido a que el suelo estaba muy compactado, luego se lo atornilló a la varilla y se lo introdujo en el suelo a cada profundidad anotando las lecturas registradas, después de cada lectura se enceró el manómetro y se tomaron 3 lecturas al azar por cada lisímetro para realizar un promedio, finalmente, para conocer la resistencia medida en cada capa con el cono utilizado, se aplicó la siguiente ecuación.

$$\text{Resistencia por } cm^2 = \frac{\text{Resistencia a la penetración (N)}}{\text{área del cono}(cm^2)} \quad (2)$$

Una vez obtenidos los datos, se realizó un gráfico que explica la resistencia medida en cada una de las profundidades, siendo profundidad de medición en el eje X y resistencia de penetración en el eje Y.



Figura 2.3 Penetrómetro manual utilizado en el lisímetro de drenaje

❖ **Velocidad de infiltración**

Se utilizó un infiltrómetro de doble anillo Turf Tec (Figura 2.4), el cual se enterró en la superficie de la primera capa (0 – 20cm) manteniéndolo nivelado con la superficie del suelo, primero se llenó de agua el anillo exterior para obtener un buffer y luego se llenó de agua el anillo interior hasta que la boya ascendió y el tornillo quedó en la línea cero de la regla, se presionó el botón de inicio, en ocasiones en la que el agua se filtraba por completo antes de los 15min, se pausó el tiempo y se rellenó el anillo interior; se tuvo muy en cuenta el agua en el anillo exterior, puesto que, este nunca debe secarse por completo o si no pierde el objetivo de ser buffer, se rellenó ese anillo constantemente; se tomaron datos de la velocidad de infiltración a los 2, 5,10 y 15 minutos, ya que, el instrumento está diseñado para dar ese valor real en el lapso de 15min y se extrapolaron esos datos a la velocidad de infiltración en 1 hora. Se repitió el mismo proceso en cada uno de los 7 lisímetros.



Figura 2.4 Infiltrómetro Turf Tec utilizado en el lisímetro de drenaje

2.4.2 Obtención del contenido de humedad del suelo

Para obtener el contenido de humedad a CC, se saturó una pequeña área de suelo en cada una de las capas del lisímetro, luego de 72 horas se tomó una muestra de aproximadamente 10g con la ayuda de un barreno, se obtuvo su peso mediante la balanza gravimétrica y luego se secó esa muestra en la secadora de suelo para conocer su peso en seco. El % de humedad del suelo a CC se obtuvo aplicando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ humedad} = \frac{[(PF - PS) * 100]}{PS} \quad (3)$$

PF: Peso fresco de la muestra (g)

PS: Peso seco de la muestra (g)

Con los valores de % de humedad a CC se pudo conocer los valores de PMP, dividiendo CC para 2.2.

2.4.3 Cálculo de la lámina de riego a aplicar

Una vez que se obtuvieron los valores del % de humedad a CC y PMP de cada capa de suelo, se realizaron los cálculos para conocer la lámina de agua que se debe reponer para llevar al suelo a CC una vez que el suelo ha perdido agua por evapotranspiración, posteriormente se sumaron los valores de lámina de agua por

cada capa para obtener la lámina total por lisímetro, realizando el mismo procedimiento para los otros 7. Aplicando la siguiente ecuación:

$$LA = \left[\frac{(CC - CAS)}{100} \right] * Z * Dap * \frac{UR}{100} * 10 \quad (4)$$

LA= Lámina de agua (mm)

CC= Capacidad de campo (%)

CAS=Contenido de agua actual en el suelo (%)

Z= Profundidad de la capa (m)

Dap= Densidad aparente (g/cm³)

UR = Umbral de riego (30%)

AL= Área del lisímetro (m²)

2.4.4 Cálculo del volumen de agua a CC

De la misma forma, se calculó el volumen de agua por capa, para luego sumarlos y obtener el volumen total por lisímetro, realizando el mismo procedimiento para los otros 7. Para conocer el volumen de agua a CC se aplicó la siguiente ecuación:

$$VCC = \left[\frac{(CC - CAS)}{100} \right] * Z * Dap * \frac{UR}{100} * AL \quad (5)$$

VCC=Volumen a capacidad de campo (m³)

CC= Capacidad de campo (%)

CAS=Contenido de agua en el suelo (%)

Z= Profundidad de la capa (m)

Dap= Densidad aparente (g/cm³)

UR = Umbral de riego (30%)

AL= Área del lisímetro (m²)

A este VCC se aplicó un sobre riego del 25% para obligar al suelo del lisímetro a que drene el agua en exceso, es decir, el Volumen de agua aplicado para llevar al suelo a Capacidad de Campo fue el siguiente:

$$VCC = VCC + VCC * 0.25 \quad (6)$$

2.5 Instalación de tensiómetros

Previo a la instalación de estos equipos se colocó dentro de cada tubo una solución de agua destilada y azul de metileno, con el objetivo de evitar el crecimiento de hongos en la parte porosa de cerámica del tensiómetro una vez que este se encuentre en el suelo, luego se los mantuvo en posición vertical dentro de un balde con agua, dejándolos en remojo. Después de las 24 horas, se instalaron 3 tensiómetros por lisímetro, dando un total de 21 en todo el bloque, se colocaron los 3 junto a un gotero en la manguera central y a una profundidad intermedia de cada capa, es decir: a 15cm, 30cm y 45cm, puesto que, las longitudes de los tensiómetros eran de 30 y 45cm, y se los debía colocar a una profundidad tal que estén dentro de una capa. Una vez instalados y cuando su lectura superaba los 30cb, nos indicaba que se debía aplicar riego; de esta manera se pudo conocer el intervalo entre riego y riego de cada cultivo.



Figura 2.5 Tensiómetros colocados en cada una de las capas del lisímetro

2.6 Siembra y diagnóstico de las variables agronómicas

Parte del uso de lisímetros de drenaje implicó analizar el mismo cultivo dentro y fuera del mismo, para ello se destinó una unidad experimental para la siembra de maíz y otro para la siembra de frejol de palo, los cuales estarán del lado de sus respectivos

lisímetros, es decir, la unidad experimental de maíz estuvo cerca del lisímetro 1,2,3 los cuales estuvieron destinados al análisis de ese cultivo y la unidad experimental de frejol de palo estuvo cerca del lisímetro 5,6,7.



Figura 2.6 Imagen aérea de la unidad experimental

2.6.1 Siembra

Se la realizó de forma manual, el frejol de palo se sembró el 9 de julio del 2022 y el maíz el día 11 de julio del mismo año, tanto en el lisímetro como en la unidad experimental. La Tabla 2.4 muestra las características de cada cultivo sembrado en el lisímetro de drenaje.

Tabla 2.4 Características del bloque de lisímetros sembrados

Descripción	Maíz	Pasto	Frejol de Palo
Tipo de riego	Goteo	Goteo	Goteo
Variedad	Advanta 9139	Cepas de Tifton	Grano café
Área del lisímetro	4.91m ²	4.91m ²	4.91m ²
Lisímetro sembrado	1,2,3	4	5,6,7
Marco de siembra	0.3m x 0.5m	Al azar	0.6m x 1m
Plantas por lisímetro	35	-	12

La Tabla 2.5 muestra las características de los cultivos sembrados en la unidad experimental.

Tabla 2.5 Características de la unidad experimental

Descripción	Maíz	Frejol de palo
Tipo de riego	Goteo	Goteo
Variedad	Advanta 9139	-
Área de unidad	0.36 Ha	0.20 Ha
Marco de siembra	0.3m x 0.8m	0.6m x 1.5m

2.6.2 Manejo del cultivo

Se realizaron fertilizaciones, fumigaciones y demalezados, días después de la siembra, tanto del cultivo analizado en el lisímetro como en la unidad experimental, tal como se detalla a continuación:

Tabla 2.6 Detalles del manejo del cultivo

Actividad	Maíz	Pasto	Frejol de palo
-Fertilización	Presiembra	Presiembra	Presiembra
(granular)	15 días	15 días	-
(foliar)	30 días	30 días	-
-Fumigación para	19 días	-	-
cogollero	30 días	-	-
-Desmalezado	22 días	22 días	22 días
	30 días	30 días	30 días

2.6.3 Unidades de muestreo

Las unidades de muestreo instaladas facilitaron la recolección de datos de las variables agronómicas y se trató de colocar en medio del campo para conseguir mayor uniformidad de datos, tal como se muestra en la Figura 2.7.



Figura 2.7 Unidades de muestreo de la unidad experimental

❖ **Maíz**

En el lote del cultivo de maíz se instalaron 5 unidades de muestreo, con dimensiones de 16m x 10m, cada unidad contenía 20 hileras de mangueras y se escogieron al azar 10 plantas centrales para la toma de las variables agronómicas.

❖ **Frejol de palo**

En el lote de cultivo de frejol se instalaron 5 unidades de muestreo, con dimensiones de 16m x 10m, cada unidad de muestreo contiene 5 hileras de mangueras y se escogieron al azar 10 plantas centrales para la toma de las variables agronómicas.

2.6.4 Variables agronómicas

Se recogieron datos a los 15 y 30 días después de la siembra, tanto en las unidades de muestreo como en el bloque de lisímetros, periodo en el cual el cultivo se encuentra en su etapa inicial.

2.6.4.1 Porcentaje de germinación

❖ **Maíz**

Se efectuó este análisis a los 8 y 15 días de haberse instalado la semilla, seleccionando las hileras 9,10,11,12 de cada unidad de muestreo para

luego promediar estos datos. Cada hilera contenía 34 goteros, siendo este el número total de semillas a germinar por hilera.

(7)

$$\% \text{ germinación} = \frac{\text{Total de semillas germinadas}}{\text{Total de Semillas sembradas}} \times 100$$

❖ Frejol de palo

Se utilizó semilla reciclada y se realizó un semillero en una bandeja germinadora de 96 agujeros, para conocer si aún es viable la semilla y el poder germinativo que posee, se empleó la siguiente ecuación:

(8)

$$\% \text{ germinación} = \frac{\text{Total de semillas germinadas}}{\text{Agujeros totales en el bandeja}} \times 100$$

2.6.4.2 Altura de la planta

Se midió su altura desde la superficie del suelo hasta donde nace la hoja bandera de la planta con la ayuda de una cinta métrica.

2.6.4.3 Circunferencia del tallo

Se midió la circunferencia de la base del tallo con una cinta métrica.

2.6.4.4 Número de hojas

Se contabilizaron el número de hojas verdaderas, completamente abiertas sin considerar la primera hoja cotiledonar.

2.6.4.5 Contenido de clorofila

Se utilizó un medidor de clorofila, escogiendo la hoja más alta y obteniendo 2 medidas en la parte central de la misma para luego promediar estos valores.

2.7 Requerimiento hídrico del cultivo en la etapa inicial

Para conocer el requerimiento hídrico del maíz y frejol de palo en su etapa fenológica inicial se sumaron todos los valores de ET_c (mm/día) en todo ese periodo en esta zona y con estas condiciones.

2.7.1 Cálculo de ETo

El cálculo de ETo se lo realizó mediante 3 métodos, para realizar una comparación de los datos obtenidos.

❖ Ecuación de Penman-Monteith

Los datos del clima para este cálculo fueron obtenidos de una data de la estación meteorológica ubicada en la zona de estudio y se lo calculó mediante el programa de ETO CALCULATOR de la FAO, donde se ingresó las coordenadas de la zona de estudio y los valores climáticos en el periodo del 11 de julio hasta el 10 de agosto, que fue la duración de etapa fenológica inicial.

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (9)$$

Δ =Pendiente de la curva de presión de vapor actual (Kpa/°C)

R_n = Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m²/día)

G = Densidad de flujo de calor del suelo (MJ/m²/día)

γ = Constante psicométrica (KPa/°C)

T = Temperatura del aire a 2m de altura (° C)

u_2 = Velocidad del viento a 2m de altura (m/s)

$(e_s - e_a)$ = Variación de presión de vapor (KPa)

❖ Tina A de evaporación

Los datos se obtuvieron de la Tina A ubicada en la zona de estudio, inicialmente se llenó de agua la tina 21 cm, luego se observó y anotó diariamente las lecturas de agua medida para conocer los mm/día que se perdían por evaporación en la zona; es importante destacar que cada semana se dejaba la tina llena en 21 cm, puesto que, no puede quedar por más de 7cm por debajo de esa medida, luego los datos no son confiables. Para este cálculo se utilizó la siguiente ecuación:

$$E_{to} \left(\frac{mm}{día} \right) = E_{tp} * K_p \quad (10)$$

Para encontrar el valor de K_p , el coeficiente de tina, se guío del Cuadro 5 del manual de la FAO; utilizando los valores de velocidad de viento y humedad relativa se pudo determinar el coeficiente de tina K_p , siendo este de 0.80.

❖ Lisimetría

Este dato se obtuvo tomando en cuenta las lecturas del medidor de agua que está ubicado en el L4, los cuales permitieron conocer el volumen de agua en m^3 que ingresada en cada riego y luego de 24 horas, mediante la recolección del agua drenada se conoció el volumen de agua en L que se desperdiciaba en el sistema y que no era aprovechada por el cultivo, estos datos permitieron el cálculo del E_{To} real aplicando la siguiente ecuación:

$$E_{To} = \frac{(VI - VD)}{AL \times IR} \quad (11)$$

E_{To} = Evaporación del cultivo de referencia

VI = Volumen ingresado (L)

VD = Volumen drenado (L)

AL = Área del lisímetro (m^2)

IR = Intervalo de riego (días)



Figura 2.8 Medidor ubicado al costado del lisímetro 4

2.7.2 Cálculo de ETc

Este cálculo se lo realizó con la Ecuación (11), pero tomando en cuenta los lisímetros destinados a cada cultivo, es decir, se calculó la ETc del maíz analizando los volúmenes de agua ingresados y drenados del lisímetro 1,2,3 y se realizó el mismo procedimiento para el frejol de palo con los lisímetros 5,6,7.

2.7.3 Precipitación horaria de riego

Se calculó la precipitación horaria, para conocer cuál es la lámina o altura de agua que suministra el sistema al bloque de lisímetros, mientras la bomba de riego se encuentra encendida.

$$P_{hr} = \frac{q_e}{d * dl} \quad (12)$$

P_{hr} = Precipitaciones horarias de riego (mm/h)

q_e = Caudal del emisor (L/h)

d = Distancia entre emisores (m)

dl = Distancia entre hileras (m)

2.7.4 Cálculo de las horas de riego

Para conocer el número de horas a partir del segundo riego, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Tiempo de riego} = \frac{ETc \text{ (mm/día)}}{Phr \text{ (mm/h)}} \quad (13)$$

Es el tiempo que se necesita que la bomba esté encendida para reponer la lámina de agua que se perdió en el sistema por la evapotranspiración del cultivo. Se debe considerar que el próximo riego se lo realizó cuando el lisímetro dejó de drenar agua completamente y los tensiómetros marcaban 30 cb.

2.7.5 Cálculo del coeficiente Kc

❖ Lisimetría

Una vez obtenidos los valores de ETc de cada cultivo y ETo del pasto de referencia se utilizó la Ecuación (14), para conocer el coeficiente tanto del cultivo de maíz como del frejol en la etapa fenológica inicial, mediante el uso del lisímetro de drenaje. Se promediaron los valores de Kc más significativos obtenidos en todos los lisímetros que analizaban un cultivo.

$$Kc = \frac{ETc}{ETo} \quad (14)$$

❖ Kc teórico

Primero se realizó un ajuste por humedecimiento parcial del suelo, debido a que el lisímetro posee un sistema de riego por goteo, de esta manera se conoce la lámina de agua que se aplica bajo este sistema.

$$Ih = \frac{I}{fh} \quad (15)$$

fh = Fracción de humedecimiento (0.40)

Ih = Lámina de riego en la porción del suelo humedecida

El valor de **Kc inicial** teórico se obtuvo considerando las Figuras 29 y 30b del Manual 56 de la FAO, las cuales para su estimación consideran los intervalos de riego promedio, la lámina de riego proporcionada y el poder evaporante ETo

teórico (Tomado de una data histórica de la estación meteorológica Simón Bolívar para el mes de Julio). Como las láminas aplicadas fueron mayores a 10 mm y menores a 40 mm, el K_c se lo estimó mediante la Ecuación (59) y por ser una textura de suelo fina se utilizó la Figura 30b del manual, la Ecuación utilizada fue la siguiente:

$$K_{c\ ini} = K_{c\ ini} (\text{Fig. 29}) + \frac{(Ih - 10)}{40 - 10} [K_{c\ ini} (\text{Fig. 30}) - K_{c\ ini} (\text{Fig. 29})] \quad (16)$$

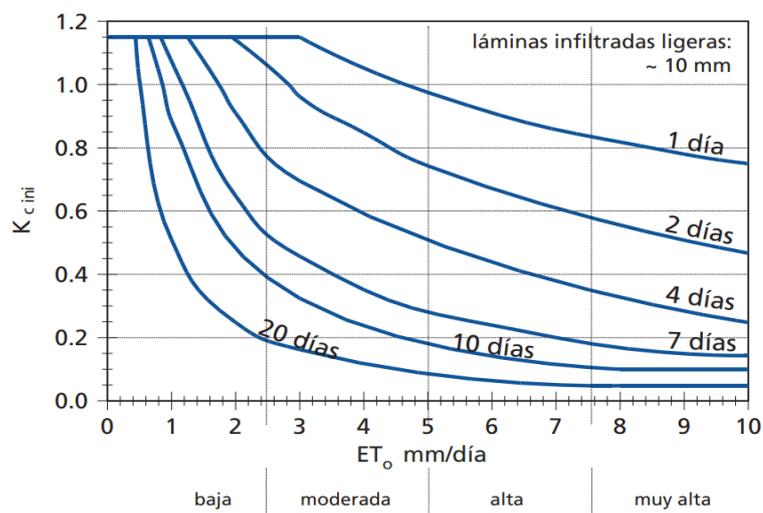


Figura 2.9 Figura 29. del Manual de la FAO

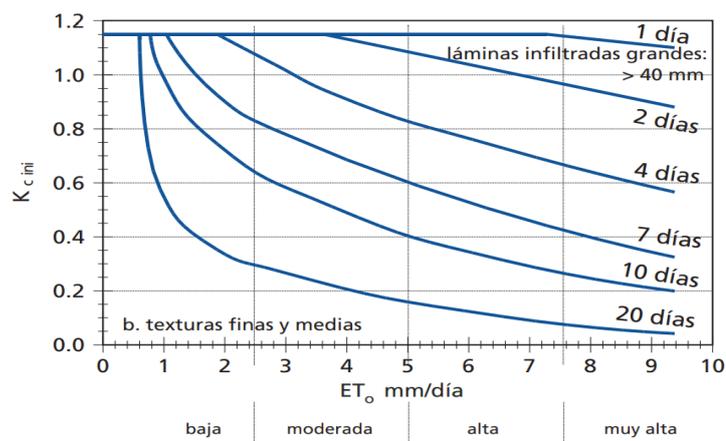


Figura 2.10 Figura 30b. del Manual de la FAO

Fue necesario ajustar los valores de $K_{cinicial}$, de acuerdo con las condiciones y manejo del área de estudio. Este valor se lo ajusta por humedecimiento parcial del suelo, el tipo de riego utilizado es por goteo, por lo tanto, la fracción de humedecimiento es de 0.40.

$$K_{cini} = fh * K_{cinici}(Cua, Fig) \quad (17)$$

El valor de **Kc medio** se corrigió, puesto que en la zona de estudio difieren los datos de humedad relativa y velocidad del viento, los cuales teóricamente deben ser de $HR_{min} = 45\%$ y $u_2 = 2m/s$, el cálculo del Kc medio se lo realizó mediante la siguiente ecuación, donde h representa la altura del cultivo en esa etapa:

$$K_{cmedio} = K_{cmed}(cuadro) + [0.04(u_2 - 2) - 0.004 (HR_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (18)$$

Este coeficiente no es necesario ajustarlo por humedecimiento parcial del suelo, puesto que, en esa etapa se encuentra en condiciones de total cobertura y no hay pérdidas significativas por evaporación.

El valor de **Kc final** se lo corrigió con la Ecuación (18), utilizando los valores de HR y u_2 promedio de la época en donde el cultivo esté en esa etapa final.

2.7.6 Curva Kc

Una vez realizado el ajuste de Kc inicial y las correcciones del Kc medio y Kc final, se ajustó la duración en días de cada etapa fenológica teóricamente para la construcción de la curva.

❖ Curva Kc teórico

Se utilizaron datos del Cuadro 11 del Manual 56 de la FAO para cada cultivo, los cuales son datos referenciales que servirán como una estimación de la duración de cada etapa del cultivo. Para el maíz, se escogió el cereal Maíz (grano) y para el cultivo de frejol, se escogió la leguminosas Judías, o Frijoles (verdes) con las siguientes duraciones:

Tabla 2.7 Duración de las etapas fenológicas teóricas

	Inicial (días)	Desarrollo (días)	Medio (días)	Final (días)
Maíz	30	50	60	40
Frejol de palo	20	30	30	10

Sin embargo, se ajustó esta duración en días de acuerdo con el desarrollo del cultivo en el área de estudio y las especificaciones de la ficha técnica de la semilla utilizada, de acuerdo con la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Ajuste de la duración de las etapas fenológicas teóricas del cultivo

Cultivo	Inicial (días)	Desarrollo (días)	Medio (días)	Final (días)
Maíz	30	35	45	20
Frejol de palo	20	40	40	10

Con los datos obtenidos se realizó la curva Kc teórica, colocando en el eje Y los valores de Kc desde 0 hasta 1.2 y el eje X los días desde 0 hasta 125 que fue la duración teórica del maíz y 110 la del frejol de palo.

Los valores Kc obtenidos mediante el lisímetro de drenaje durante la etapa fenológica inicial del cultivo se los graficó mediante puntos, puesto que, aún no se puede construir su curva real.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Evaluación de pruebas físicas

Los valores de las propiedades físicas promedio evaluadas en cada uno de los lisímetros se muestran en la Tabla 3.1. De acuerdo con la USDA (Institute, 1998), en la Tabla 3. Velocidades y Clases de infiltración, indica que velocidades de infiltración mayores a 50cm/hora son consideradas muy rápidas, entre 15.24 – 50.80 cm/hora son consideradas rápidas y entre 0.51 – 0.0038 son consideradas muy lentas.

De la misma forma, en la Tabla 4. Relación general entre densidad aparente del suelo y crecimiento radicular, en base a textura de suelo, indica que para un suelo franco arcillo limoso, valores de densidad aparente mayor a 1.55 g/cm³ pueden afectar el crecimiento radicular de las plantas.

Tabla 3.1 Propiedades físicas promedio del bloque de lisímetros

Lisímetro	Profundidad	Promedio por capa (N)	Resistencia por capa (N/cm ²)	Densidad aparente (g/cm ³)	Velocidad de Infiltración (cm/h)
L1	20	340.0	69.4	1.04	74.4
	40	293.3	59.9	1.22	
	60	473.3	96.6	1.25	
L2	20	300.0	61.2	1.04	20
	40	313.3	63.9	1.22	
	60	320.0	65.3	1.25	
L3	20	273.3	55.8	1.04	38
	40	246.7	50.3	1.22	
	60	226.7	46.3	1.25	
L4	20	333.3	68.0	1.15	84.4
	40	253.3	51.7	1.24	
	60	226.7	46.3	1.27	
L5	20	220.0	44.9	1.08	96.4
	40	260.0	53.1	1.34	
	60	226.7	46.3	1.24	
L6	20	293.3	59.9	1.08	41.2
	40	273.3	55.8	1.34	
	60	233.3	47.6	1.24	
L7	20	293.3	59.9	1.08	64
	40	266.7	54.4	1.34	
	60	280.0	57.1	1.24	

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 3.1, establecemos que el bloque de lisímetro con una textura de suelo franco arcillo limosa, posee una densidad aparente promedio de 1.19 g/cm^3 , lo que indica que es un valor ideal para el crecimiento radicular de las raíces, por otro lado, su velocidad de infiltración en promedio es de 56.94 cm/hora indicando que está dentro de la clase de infiltración muy rápida, cabe destacar que estos valores se obtuvieron luego de realizar la preparación de terreno, por ende el suelo se encontraba suelto y sin compactación.

En la Figura 3.1 se muestra un gráfico que relaciona la resistencia de la profundidad de penetración y la profundidad de cada capa analizada en cada lisímetro. Se observa que, en la primera capa de 20cm, los Lisímetros 2,3,6,7 presentan valores de resistencia en un rango de 55 a 62 N/cm^2 , mientras que los otros lisímetros están fuera de ese rango. En la segunda capa de 40cm se observa que los Lisímetros 3,4,5,6 se encuentran en un rango de 50 a 56 N/cm^2 , mientras que los Lisímetros 1,2 presentan una resistencia mayor a 60 N/cm^2 . En la tercera capa de 60cm de profundidad se observa que los Lisímetros 3,4,5,6 se encuentran en un rango de 44 a 47 N/cm^2 , mientras que los Lisímetros 1,2,7 presentan valores superiores a 57 N/cm^2 .

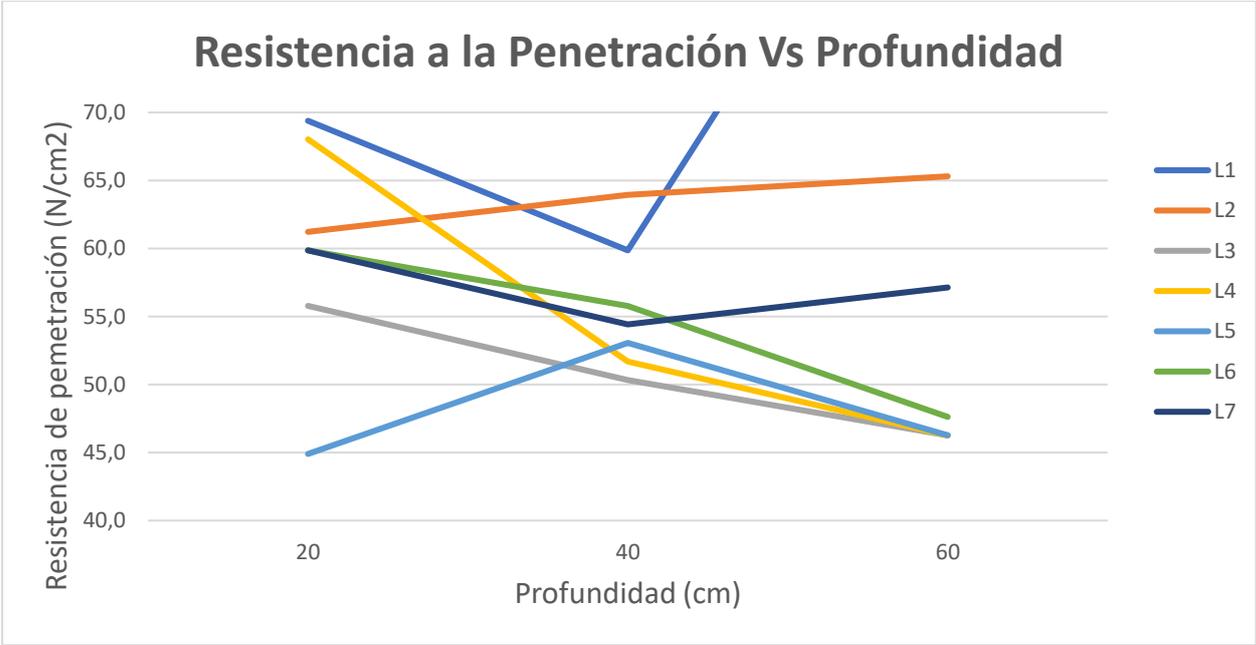


Figura 3.1 Gráfico de resistencia Vs profundidad

3.2 Obtención del contenido de humedad inicial del suelo

En la Tabla 3.2 se muestran los porcentajes de humedad que debe tener cada suelo del Lisímetro para estar a Capacidad de campo y los valores en los cuales, con ese porcentaje de humedad, el suelo se encuentra en Punto de marchitez permanente, lo que pasará cuando el suelo pierda más del 50% de su agua disponible.

Tabla 3.2 Contenido de humedad a CC y PMP

Lisímetro	Capacidad de campo (%H) Prom	Punto de marchitez permanente (%H) Prom
L1	35.87	16.31
L2	35.87	10.11
L3	35.87	10.11
L4	37.41	17.00
L5	37.51	17.05
L6	37.51	17.05
L7	37.51	17.05

Una vez obtenido el contenido de humedad del suelo a CC y PMP se obtuvieron los siguientes valores del volumen a aplicar en el primer riego en cada uno de los lisímetros y la lámina de agua que ese volumen representa.

Tabla 3.3 Volumen de agua a aplicar en el primer riego

Lisímetro	Volumen a aplicar (m ³)	Lámina riego (mm/m ²)	Volumen por aplicar (m ³) (25% drenaje)
L1	0.10	20.57	0.13
L2	0.16	32.46	0.20
L3	0.16	33.43	0.20
L4	0.12	23.89	0.15
L5	0.12	23.49	0.14
L6	0.00	20.88	0.13
L7	0.11	22.38	0.14

Siendo, 130 L de agua lo que se suministró al lisímetro 1, 200 L al lisímetro 2, 200 L al lisímetro 3, 150 L al lisímetro 4, 140 L al lisímetro 5, 130 al lisímetro 6 y 140 L al lisímetro 7 respectivamente.

3.3 Variables agronómicas

❖ Porcentaje de germinación

En la Tabla 3.4 se muestra el porcentaje de germinación que tuvieron las semillas recicladas de frejol de palo, el cual aumentó conforme pasaron los días hasta llegar al día 5, logrando un 95.83% de germinación, lo que demostró que las semillas a pesar de ser recicladas aún eran viables y con un alto poder germinativo. Sin embargo, las semillas en la unidad experimental demoraron 8 días en germinar, esto se debe a que la textura del suelo en la unidad fue más dura que la del semillero.

Tabla 3.4 Porcentaje de germinación de frejol de palo

Fecha	Semillas germinadas	Número de agujeros	% de germinación
8/7/2022	11	96	11.46
12/7/2022	88	96	91.67
13/7/2022	92	96	95.83

Para el cultivo de maíz Advanta 9139 se tuvieron los siguientes resultados respecto al porcentaje de germinación, a los 8 días la unidad de muestreo 1 presentó 83.82% de germinación, la unidad 2 con 72.79%, la unidad 3 con 75.74%, la unidad 4 con 84.56%, manteniendo un promedio de 79.23% de germinación en la unidad experimental, cada hilera de manguera tiene 34 goteros y en total de las 4 hileras de mangueras analizadas se tuvo un total de semillas germinadas.

Tabla 3.5 Porcentaje de germinación del maíz a los 8 días

Unidad de muestreo	Semillas germinadas	Número de goteros	% de germinación
1	114	34	83.82
2	99	34	72.79
3	103	34	75.74
4	115	34	84.56
Promedio			79.23

Luego de los 22 días se volvió a realizar el mismo análisis para conocer el % de germinación del maíz. Para lo cual, se obtuvo que el porcentaje en las unidades de

muestreo fueron superiores a 90% y en la unidad experimental en promedio fue de 93.38%, un valor bastante aceptable en campo.

Tabla 3.6 Porcentaje de germinación del maíz a los 30 días

Unidad de muestreo	Semillas germinadas	Número de goteros	% de germinación
1	131	34	96.32
2	128	34	94.12
3	123	34	90.44
4	126	34	92.65
Promedio			93.38

❖ Variables obtenidas

A los 20 días de haberse establecido la semilla en el campo se dió por culminada la etapa fenológica inicial del frejol, desde el 9 hasta el 29 de julio, bajo las siguientes condiciones climáticas: Temperatura media de 23.39°C, humedad relativa de 82.75%, velocidad del viento de 1.31m/s.

Para esta fecha, en la Tabla 3.7 se observa que los valores promedios en la unidad experimental son de, 36.04 cm de altura, 20.14 de contenido de clorofila y 4.8 el número de hojas, el cual representa a 2 trifoliolos completamente abiertos y dos hojas primarias, indicando que se encuentra en la fase vegetativa V3 (Fernandez, 1985).

Tabla 3.7 Variables agronómicas del frejol en la unidad experimental

Unidad de muestreo	Altura (cm)	Grosor de tallo (cm)	Contenido de clorofila	Número de hojas
1	34.2	-	19.6	4.2
2	36.6	-	18.9	5
3	34.8	-	22.3	5.6
4	38.4	-	19.5	4.8
5	36.2	-	20.4	4.4

De la misma forma, se evaluaron las variables en el L5, L6 y L7 y se obtuvieron los siguientes valores promedios, 38.1 cm de altura, 23.96 contenido de clorofila, 2 trifoliolos completamente abiertos y 2 hojas primarias, los cuales se detallan en la Tabla 3.8. Se tuvo mejores resultados de las variables analizadas en el lisímetro, puesto que se pudo

controlar las interacciones con el cultivo, suministrando el agua calculada y cuidándolo de condiciones adversas.

Tabla 3.8 Variables agronómicas del frejol en el lisímetro

Lisímetro	Altura (cm)	Grosor de tallo (cm)	Contenido de clorofila	Número de hojas
4	35	-	19.2	4.7
5	35.8	-	24.4	4
6	43.5	-	28.3	4.8

A los 30 días de haberse establecido la semilla en campo se dió por culminada la etapa fenológica inicial del maíz, desde el 11 de julio hasta el 10 de agosto, bajo las siguientes condiciones climáticas: Temperatura media de 23.39°C, humedad relativa de 82.75%, velocidad del viento de 1.31m/s, lo que concuerda con el Cuadro 11 del Manual 56 de la FAO, que indica que para un clima árido la duración de la etapa fenológica del maíz es de 20 – 30 días (Doorenbos, 1998).

Para esta fecha, el cultivo presentaba las variables promedio que se muestran en la Tabla 3.9. Se observa que la unidad de muestreo 3 presentó valores mayores que las otras 4 unidades, pudiendo ser atribuido a su localización, debido a que por estar en medio campo no es tan perturbado por el medio, por otro lado, la unidad 5 presentó valores menores que las otras unidades, puesto que esa unidad se encuentra junto al bosque y los animales se alimentaban de ese maíz, afectando su desarrollo.

En promedio, en la unidad experimental se tuvo que la altura del maíz a los 30 días fue de 23.94cm, el grosor del tallo de 3.93cm, contenido de clorofila de 19.10 y 5 hojas completamente abiertas, indicando que se encuentra en la fase vegetativa V5.

Tabla 3.9 Variables agronómicas del maíz en la unidad experimental

Unidad de muestreo	Altura (cm)	Grosor de tallo (cm)	Contenido de clorofila	Número de hojas
1	29.6	4.29	20.91	6.3
2	27.4	4.2	17.01	5
3	34.3	4.18	22.38	5.8
4	28.2	3.58	17.63	5.89

5	26.2	3.42	17.59	4.6
---	------	------	-------	-----

De la misma forma, se evaluaron las variables en el lisímetro 1,2,3 y se tuvieron los siguientes valores promedio, 35.4 cm de altura, 5.6 cm de grosor de tallo, 20.73 de contenido de clorofila y 6 hojas completamente abiertas. Se observa que en el lisímetro los valores fueron mucho más favorables que en la unidad experimental, esto se debe a que en el lisímetro se manejaron mejor estas variables, puesto que, no había daños por animales, se aseguraba el suministro de agua calculado, se observaron que las mangueras estén en buen estado y funcionando, cosas que fueron más complicadas controlarlas en campo abierto.

Tabla 3.10 Variables agronómicas del maíz en el lisímetro

Lisímetro	Altura (cm)	Grosor de tallo (cm)	Contenido de clorofila	Número de hojas
1	33.3	5.0	19.9	5.9
2	37.3	5.6	22.1	6.1
3	35.7	6.2	20.2	6.1

3.4 Requerimiento hídrico del cultivo

❖ Cálculo de ETo

En la Tabla 3.11 se observan los valores de ETo obtenidos mediante los 3 diferentes métodos. La mayoría de los valores de la Tina A difieren significativamente de los de Penman, y este a su vez difiere al compararlo con los datos obtenidos del lisímetro 4, pero uno que otro dato resultó cercano. De acuerdo con estos valores, el método Penman sigue brindando valores de evapotranspiración del cultivo de referencia más cercanos a los reales en campo. Las fechas que se encuentran en la Tabla, son en las que se aplicó el riego.

Tabla 3.11 Comparación de ETo

Fecha	Lisímetro	Penman	Tina A
11/7/2022	-	1.7	0
14/7/2022	2	2.6	0.8
18/7/2022	0.2	2.5	0.8
19/7/2022	9.3	2.4	3.2
22/7/2022	2.6	2.2	4.8
27/7/2022	2.8	3.1	4.8
2/8/2022	4.1	2.3	1.6
10/8/2022	3.4	3.2	1.6

La Figura 3.2 muestra una comparación gráfica de estos tres métodos, en la cual se puede observar la tendencia de los datos, pese a que en su mayoría no son valores cercanos, resultaron con picos en los mismos días.

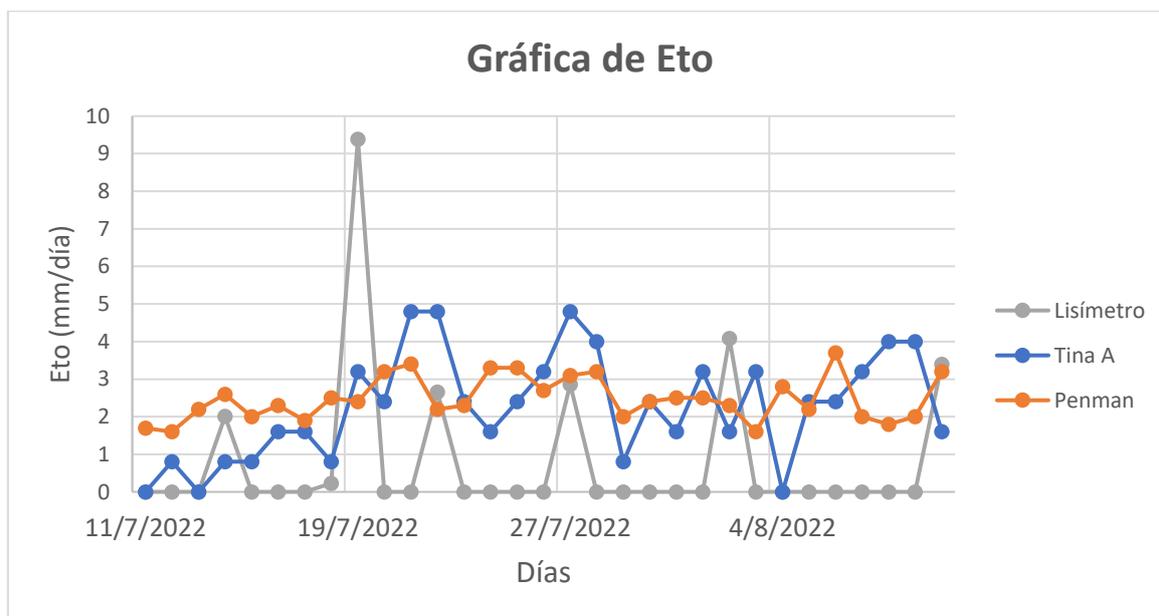


Figura 3.2 Gráfica de comparación de ETo

❖ Cálculo de ETc

La precipitación horaria en el bloque de lisímetros es de 10mm/ hora, puesto que tienen un espaciado entre mangueras de 0.5m y 0.3m entre emisores, la precipitación en la unidad experimental es de 2.67mm/h, puesto que poseen un espaciado entre mangueras de 1.5m y entre emisores de 0.3m.

Las horas de riego dependieron de la lámina de agua que había que reponer al sistema, generalmente, el tiempo en el cuál la bomba de riego tenía que estar encendida para reponer dicha lámina fue de 1 a 3 horas.

La frecuencia de riego fue cada 4 días, puesto que ese fue el tiempo en el cual los tensiómetros marcaron 30cb, indicando que se debía aplicar riego.

Con los valores de ETc y ETo obtenidos en esta etapa mediante el uso del lisímetro, se determinó los valores de Kc inicial en cada cultivo, los cuales se muestran en la Tabla 3.12. Los valores obtenidos fueron altos en comparación a los mostrados en el Manual 56 de la FAO, los cuales están por debajo de 0.46, esto puede deberse a las condiciones climáticas de ese mes (Doorenbos, 1998).

Tabla 3.12 Coeficiente único del cultivo

	Frejol de palo	Maíz
Kc inicial	0.71	0.78

Para un bosque seco tropical, que es la zona de vida del área de estudio y bajo las condiciones edafoclimáticas en las que se encuentra, se determinó que, los valores de ETc de frejol de palo fue de 20.60mm en los 20 días que duró su etapa fenológica inicial, siendo un valor muy parecido al 21.51mm obtenido en (Chavarría, 2020) y del maíz fue de 23.81mm en los 30 días en los que duró su etapa inicial.

❖ **Curva de Kc teórico**

Las Figuras 3.3 y 3.4 muestran la curva teórica ajustada de color azul del cultivo de frejol de palo y maíz. Los puntos naranjas representan los Kc obtenidos mediante el bloque de lisímetro de drenaje, se observan que los Kc están disparados y no se ajustan a la curva teórica, sin embargo, puede ser por las condiciones ambientales en las cuales se efectuó el análisis de los cultivos. La Tabla 3.13 y 3.14 muestran los Kc teóricos obtenidos del cuadro 12 del manual de la FAO, los días ajustados de acuerdo con la zona de estudio y los Kc ajustados mediante las Ecuaciones (17) y (18), los cuales sirvieron para la realización de la curva.

Tabla 3.13 Kc teórico y ajustado de cultivo de maíz

	Kc teórico	Días	Kc ajustado
Inicial	0.45	0	0.4
Inicial	0.45	30	0.4
Medio	1.2	65	1.14
Medio	1.2	110	1.14
Final	0.35	130	0.28

Tabla 3.14 Kc teórico y ajustado del cultivo de frejol

	Kc teórico	Días	Kc ajustado
Inicial	0.4	0	0.4
Inicial	0.4	30	0.4
Medio	1.15	70	1.08
Medio	1.15	110	1.08
Final	0.55	120	0.48

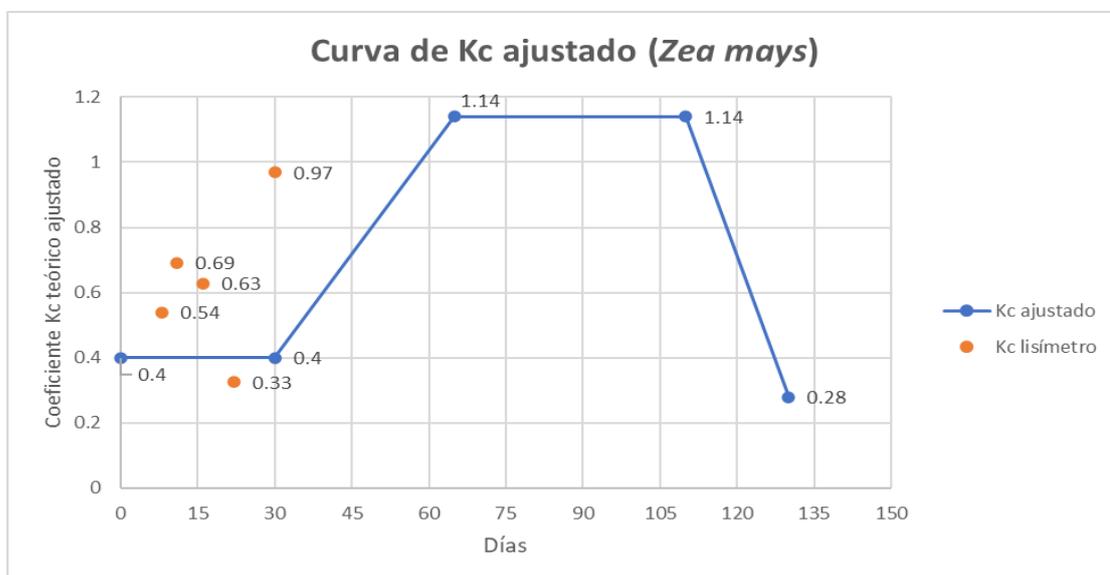


Figura 3.3 Curva Kc de maíz

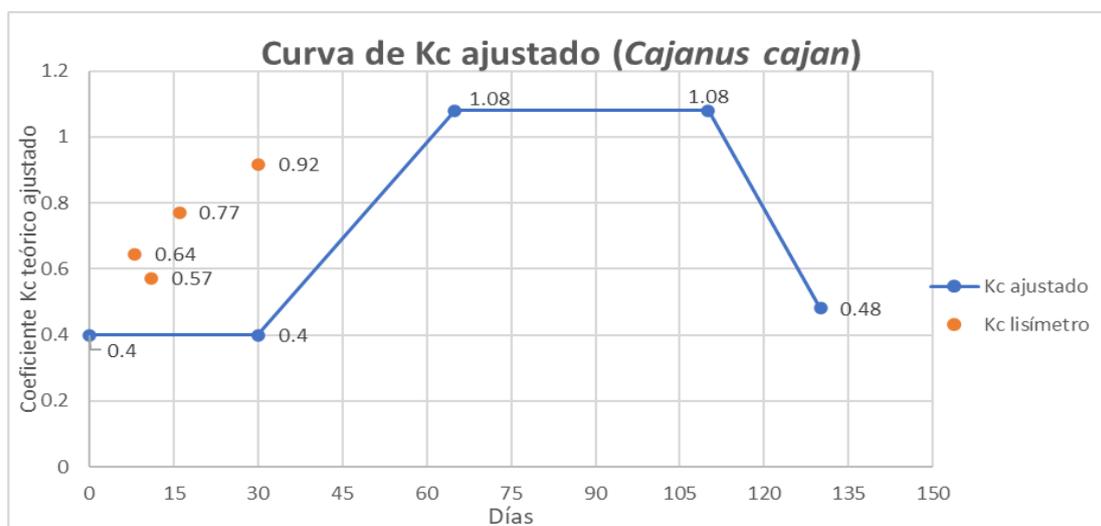


Figura 3.4 Curva Kc de frejol de palo

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

1. Mediante la calibración del bloque de lisímetros se conoció que el suelo en el que se realizó el análisis, siendo de textura franco arcillo limoso, posee una densidad aparente promedio de 1.19 g/cm³, el cual es considerado un valor ideal para el crecimiento radicular, su velocidad de infiltración es de 56.94cm/h siendo una clase de infiltración muy rápida, además de valores bajos de resistencia del suelo.
2. Las 5 unidades de muestreo instaladas en cada unidad experimental, permitieron recolectar información de las variables agronómicas de forma más eficiente, obteniendo valores promedio óptimos para esta etapa, en el caso del frejol de palo 2 trifoliolos y 2 hojas primarias encontrándose en la fase V3, altura de 36.04cm y 20.14 de contenido de clorofila; en el caso del maíz valores promedios de 23.94cm, grosor de tallo de 3.93cm, contenido de clorofila de 19.10 y 5 hojas completamente abiertas, encontrándose en la fase V5.
3. Las variables agronómicas mostraron mejores resultados en el bloque de lisímetros que en la unidad experimental, puesto que, en el bloque se pudo controlar las entrada y salida del agua, solucionar algún daño de infraestructura y cuidar las plantas de agentes externos, lo que no ocurrió en la unidad experimental, puesto que es más complicado brindar esa exclusividad en áreas más grandes sembradas.
4. De acuerdo con la zona de vida del área de estudio, para un bosque seco tropical, la duración de la etapa fenológica inicial para el cultivo de frejol de palo fue de 20 días y para el cultivo maíz de 30 días, con un consumo de agua de 20.60mm y 23.81mm respectivamente, y un intervalo de riego de 4 días.
5. Los coeficientes hallados en esta área de estudio mediante lisímetros de drenaje fueron de 0.71 y 0.78 del frejol de palo y maíz respectivamente, estos valores fueron altos en comparación a datos obtenidos de bibliografía, sin embargo, fueron los que se obtuvieron mediante esta metodología.

4.2 Recomendaciones

1. Replicar este trabajo para otros periodos de tiempo, permitiendo conocer cómo se comporta el mismo cultivo con otros datos climáticos.
2. Utilizar el bloque de lisímetros de drenaje como metodología para conocer la evapotranspiración real de diversos cultivos en la zona de vida de bosque seco tropical.
3. En campo, revisar constantemente el estado de las tuberías y mangueras, puesto que, si una de ellas se daña y empieza a derrochar agua, los valores para determinar el consumo de agua se van a ser afectados.
4. Procurar drenar toda el agua que no fue aprovechada por el cultivo antes del próximo riego, de esa manera se evade mezclar cantidades de agua del riego actual y el riego pasado, evitando que eso afecte a los resultados.
5. Trazar unidades de muestreo para que se facilite la toma de datos de las variables agronómicas y extrapolarlos a la superficie total sembrada.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Ávila, L. (2021). *GESTIÓN DEL RIEGO BASADO EN LA VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN DEL AGUA EN EL SUELO MEDIANTE LISIMETRÍA DE PESADA*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena.
- Briceño, M. Á. (2012). *Zamorano*. (2. Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, Ed.)
Obtenido de Manual técnico de riego con énfasis en riego por goteo:
<https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/8075b49c-97bc-4398-a5e2-f1ae540b5078/content>
- Caviedes, M. C. (2022). Tecnologías para el cultivo de maíz (*Zea mays*) en el Ecuador. (G. Albán, Ed.) *avances en ciencias e ingenierías*, 4.
- Chavarría, J. R. (2020). Coeficiente del cultivo de *Vigna unguiculata* L. Walp. para períodos secos y lluviosos en el valle del río Chone. *La Técnica*, 14.
- Denoia, J. G. (2008). Penetrómetro para el estudio de costras de suelo en laboratorio. *SciELO*.
- Doorenbos, J. P. (1998). *Evapotranspiración del cultivo, Manual 56*. Estudio FAO Riego y drenaje. FAO.
- ESPOL. (4 de noviembre de 2021). *Escuela Superior Politécnica del Litoral*. Obtenido de ESPOL inaugura batería de lisímetros para medir consumo de agua en diferentes cultivos hortícolas del país: <https://www.espol.edu.ec/noticias/espol-inaugura-bater%C3%ADa-de-lis%C3%ADmetros-para-medir-consumo-de-agua-de-plantas>
- Fernandez, F. G. (1985). *Etapas de desarrollo en la planta de frijol*.
- Gabriels, D. L. (2011). Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo. *Venesuelos*, 14(1), 37-48.
- González, O. I. (2009). “Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola”. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(2), 57-63.
- Grajales, A. J. (2010). “LOS NUEVOS CONCEPTOS SOBRE “AGUA VIRTUAL” Y “HUELLA HÍDRICA” APLICADOS AL DESARROLLO SOSTENIBLE: IMPLICACIONES DE LA AGRICULTURA EN EL CONSUMO HÍDRICO”. (U. d. Caldas, Ed.) *AGRONOMIA*, 16, 8-10.

- Guzman, D. (2017). *“ETAPAS FENOLÓGICAS DEL MAIZ (Zea mays L.) VAR. TUSILLA BAJO LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS DEL CANTÓN CUMANDÁ, PROVINCIA DE CHIMBORAZO”*. Tesis, Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Chimborazo, Ecuador.
- Huaman, J. (2016). *“EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN POR PRECIPITACIONES, UTILIZANDO INFILTRÓMETRO DE DOBLE ANILLO EN LA ZONA DE RECARGA HÍDRICA DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA DE RONTOCOCHA-ABANCAY, 2016”*. Tesis, Perú.
- Institute, S. Q. (1998). *Soil quality test guide*. Soil Quality Institute, National Resources Conservation, US Department of Agriculture.
- Lara, G. (2016). *Diseño de una granja experimental agroproductiva en áreas del campo experimental y enseñanza agropecuaria*. Tesis, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de ciencias de la vida, Guayaquil, Ecuador.
- Machaca, L. (2011). *“DETERMINACIÓN DE LAS NECESIDADES DE AGUA DEL CULTIVO HABA BABY MEDIANTE LISÍMETROS DE DRENAJE EN LA IRRIGACIÓN MAJES – AREQUIPA”*. Tesis, Universidad Nacional del Altiplano-Puno, Perú.
- Manzur, A. C. (2015). "Velocidad de evaporación del agua". *Revista Mexicana de Física*, 61, 31-34.
- Míte, R. (2018). *ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA ELABORACIÓN DE UNA PASTA DULCE A BASE DE FREJOL DE PALO (CAJANUS CAJAN) EN EL CANTÓN 24 DE MAYO DE LA PROVINCIA DE MANABI*. Tesis, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
- Ocampo, D. R. (2012). "Estimación de la fracción evaporativa a partir de registros de humedad de suelo y un lisímetro de pesada". *Artículo presentado en el 8vo Encuentro Internacional del E-ICES. Mar del Plata*, 10.
- Rios, E. (2016). *FRIJOL GUANDUL (Cajanus cajan L) UNA ALTERNATIVA DE SEGURIDAD ALIMENTARIA Y OTROS USOS, BASES PARA UN PLAN DE FOMENTO EN LA PROVINCIA DE GUANENTA, SANTANDER*. Tesis, UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA , FACULTAD CIENCIAS AGRARIAS, SANTANDER , SAN GIL .

- Salazar, F. (2020). *“DISEÑO, INSTALACIÓN Y CALIBRACIÓN DE BLOQUE DE SIETE LISIMETROS DE DRENAJE PARA AJUSTE DE COEFICIENTE DE CULTIVOS (Kc).”*. Tesis, Riobamba, Ecuador.
- Salgado, E. (1990). *Manejo del riego. Curso Internacional, Producción, Postcosecha.*
- Salguero, C. (2018). *“EVALUACIÓN DE TRES MÉTODOS PARA DETERMINAR EL REQUERIMIENTO HÍDRICO, DEL CULTIVO DE MAÍZ (Zea mays. L.) var INIAP 102, CANTÓN RIOBAMBA, PROVINCIA DE CHIMBORAZO”*. Tesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.
- Torretta, J. (2017). *“Cálculo de los requerimientos hídricos del maíz y ajuste del Kc mediante el uso de lisímetros de drenaje en el Valle Inferior del río Negro”*. Tesis, Universidad Nacional de Río Negro, Argentina.

6. APÉNDICES

Datos del riego en cada lisímetro

Fecha de riego	Número de días de un riego a otro	Horas de riego en campo	Área del lisímetro (m ²)	Phr (mm/h)	Etc acumulada (mm)	Tiempo de riego(h)	Lectura del medidor (m ³)	Agua ingresada (m ³)	Agua ingresada (L)	Agua drenada (L)	Agua Almacenada (L)	Etc (mm/día)	Eto (mm/día)	Kc	Etapa
11/7/2022	-	0	4.91				8.955	-	-	-			0.00	0	
14/7/2022	3	2	4.91	10.00			9.071	0.116	116	33	83	5.63	2.01	2.81	Inicial
18/7/2022	4	2.5	4.91	10.00	11.83	1.18	9.196	0.125	125	60.8	64.2	3.27	0.23	14.24	Inicial
19/7/2022	1	3	4.91	10.00	3.27	0.33	9.329	0.133	133	105	28	5.70	9.39	0.61	Inicial
22/7/2022	3	2	4.91	10.00	12.30	1.23	9.428	0.099	99	72	27	1.83	2.65	0.69	Inicial
27/7/2022	5	3	4.91	10.00	13.43	1.34	9.628	0.2	200	148	52	2.12	2.86	0.74	Inicial
30/7/2022	3	5	4.91	10.00	7.32	0.73	9.858	0.23	230	161	69	4.68	0.00	#DIV/0!	Inicial
2/8/2022	3	9	4.91	10.00	7.18	0.72	10.197	0.339	339	323	16	1.09	4.08	0.27	Inicial
10/8/2022	8	7	4.91	10.00	17.19	1.72	10.551	0.354	354	220	134	3.41	3.39	1.01	Inicial

Figura 6.1 Datos del riego del Lisímetro 2

Fecha de riego	Número de días de un riego a otro	Horas de riego en campo	Área del lisímetro (m ²)	Phr (mm/h)	Etc acumulada (mm)	Tiempo de riego(h)	Lectura del medidor (m ³)	Agua ingresada (m ³)	Agua ingresada (L)	Agua drenada (L)	Agua Almacenada (L)	Etc (mm/día)	Eto (mm/día)	Kc	Etapa
11/7/2022	-	0	4.9				9.425	-	-	-			0.00	0.00	
14/7/2022	3	2	4.9	10.00			9.995	0.57	570	117.5	452.5	30.78	2.01	15.34	Inicial
18/7/2022	4	2.5	4.9	10.00	36.98	3.70	10.208	0.213	213	126.5	86.5	4.41	0.23	19.22	Inicial
19/7/2022	1	3	4.9	10.00	4.41	0.44	10.343	0.135	135	113.35	21.65	4.42	9.39	0.47	Inicial
22/7/2022	3	2	4.9	10.00	11.02	1.10	10.445	0.102	102	75	27	1.84	2.65	0.69	Inicial
27/7/2022	5	3	4.9	10.00	13.44	1.34	10.656	0.211	211	175	36	1.47	2.86	0.51	Inicial
30/7/2022	3	5	4.9	10.00	6.67	0.67	10.898	0.242	242	153.5	88.5	6.02	0.00		Inicial
2/8/2022	3	9	4.9	10.00	8.52	0.85	11.291	0.393	393	370	23	1.56	4.08	0.38	Inicial
10/8/2022	8	7	4.9	10.00	17.66	1.77	11.645	0.354	354	230	124	3.16	3.39	0.93	Inicial

Figura 6.2 Datos del riego del Lisímetro 3

Fecha de riego	Número de días de un riego a otro	Horas de riego en campo	Área del lisímetro (m ²)	Phr (mm/h)	Etc acumulada (mm)	Tiempo de riego(h)	Lectura del medidor (m ³)	Agua ingresada (m ³)	Agua ingresada (L)	Agua drenada (L)	Agua Almacenada (L)	Eto (mm)	Etapa
11/7/2022	-	0	4.9				8.853	-	-	-			
14/7/2022	3	2	4.9	10.00			8.960	0.107	107	77.5	29.5	2.01	Inicial
18/7/2022	4	2.5	4.9	10.00	8.21	0.82	8.966	0.006	6	1.5	4.5	0.23	Inicial
19/7/2022	1	3	4.9	10.00	0.23	0.02	9.091	0.125	125	79	46	9.39	Inicial
22/7/2022	3	2	4.9	10.00	15.99	1.60	9.179	0.088	88	49	39	2.65	Inicial
27/7/2022	5	3	4.9	10.00	14.25	1.43	9.379	0.2	200	130	70	2.86	Inicial
30/7/2022	3	5	4.9	10.00	8.06	0.81	9.379	0	0	0	0	0.00	Inicial
2/8/2022	5	9	4.9	10.00	2.50	0.25	9.699	0.32	320	220	100	4.08	Inicial
10/8/2022	8	7	4.9	10.00	20.18	2.02	10.034	0.335	335	202	133	3.39	Inicial

Figura 6.3 Datos del riego del Lisímetro 4

Fecha de riego	Número de días de un riego a otro	Horas de riego en campo	Área del lisímetro (m2)	Phr (mm/h)	Etc acumulada (mm)	Tiempo de riego(h)	Lectura del medidor (m3)	Agua ingresada (m3)	Agua ingresada (L)	Agua drenada (L)	Agua Almacenada (L)	Etc (mm/día)	Eto (mm/día)	Kc	Etapa
11/7/2022	-	0	4.9				9.405	-	-	-			0.00		
14/7/2022	3	2	4.9	10.00			9.522	0.117	117	2.75	114.25	7.77	2.01	3.87	Inicial
18/7/2022	4	2.5	4.9	10.00	13.97	1.40	9.638	0.116	116	19.1	96.9	4.94	0.23	21.53	Inicial
19/7/2022	1	3	4.9	10.00	4.94	0.49	9.765	0.127	127	98	29	5.92	9.39	0.63	Inicial
22/7/2022	4	2	4.9	10.00	12.52	1.25	9.861	0.096	96	68	28	1.43	2.65	0.54	Inicial
27/7/2022	5	3	4.9	10.00	13.03	1.30	10.068	0.207	207	150	57	2.33	2.86	0.81	Inicial
30/7/2022	3	5	4.9	10.00	7.53	0.75	10.292	0.224	224	41.5	182.5	12.41	0.00		Inicial
2/8/2022	3	9	4.9	10.00	14.91	1.49	10.679	0.387	387	250	137	9.32	4.08	2.28	Inicial
10/8/2022	8	7	4.9	10.00	25.42	2.54	11.017	0.338	338	215	123	3.14	3.39	0.92	Inicial

Figura 6.4 Datos del riego del Lisímetro 5

Fecha de riego	Número de días de un riego a otro	Horas de riego en campo	Área del lisímetro (m2)	Phr (mm/h)	Etc acumulada (mm)	Tiempo de riego(h)	Lectura del medidor (m3)	Agua ingresada (m3)	Agua ingresada (L)	Agua drenada (L)	Agua Almacenada (L)	Etc (mm/día)	Eto (mm/día)	Kc	Etapa
11/7/2022	-	0	4.9				9.000	-	-	-			0.00	0.00	
14/7/2022	3	2	4.9	10.00			9.126	0.126	126	1.25	124.75	8.49	2.01	4.23	Inicial
18/7/2022	4	2.5	4.9	10.00	8.49	0.85	9.250	0.124	124	57	67	3.42	0.23	14.89	Inicial
19/7/2022	1	3	4.9	10.00	3.42	0.34	9.383	0.133	133	102	31	6.33	9.39	0.67	Inicial
22/7/2022	3	2	4.9	10.00	6.33	0.63	9.469	0.086	86	63	23	1.56	2.65	0.59	Inicial
27/7/2022	5	3	4.9	10.00	1.56	0.16	9.674	0.205	205	152	53	2.16	2.86	0.76	Inicial
30/7/2022	3	5	4.9	10.00	2.16	0.22	9.901	0.227	227	158	69	4.69	0.00		Inicial
2/8/2022	3	9	4.9	10.00	4.69	0.47	10.237	0.336	336	285	51	3.47	4.08	0.85	Inicial
10/8/2022	8	7	4.9	10.00	3.47	0.35	10.654	0.417	417	295	122	3.11	3.39	0.92	Inicial

Figura 6.5 Datos del riego del Lisímetro 6

Fecha de riego	Número de días de un riego a otro	Horas de riego en campo	Área del lisímetro (m2)	Phr (mm/h)	Etc acumulada (mm)	Tiempo de riego(h)	Lectura del medidor (m3)	Agua ingresada (m3)	Agua ingresada (L)	Agua drenada (L)	Agua Almacenada (L)	Etc (mm/día)	Eto (mm/día)	Kc	Etapa
11/7/2022	-	0	4.9				9.399	-	-	-			0.00	0	
14/7/2022	3	2	4.9	10.00			9.517	0.118	118	80	38	2.59	2.01	1.29	Inicial
18/7/2022	4	2.5	4.9	10.00	8.79	0.88	9.642	0.125	125	61.5	63.5	3.24	0.23	14.11	Inicial
19/7/2022	1	3	4.9	10.00	3.24	0.32	9.776	0.134	134	105	29	5.92	9.39	0.63	Inicial
22/7/2022	3	2	4.9	10.00	12.52	1.25	9.864	0.088	88	65	23	1.56	2.65	0.59	Inicial
27/7/2022	5	3	4.9	10.00	13.16	1.32	10.065	0.201	201	149	52	2.12	2.86	0.74	Inicial
30/7/2022	3	5	4.9	10.00	7.32	0.73	10.294	0.229	229	145.5	83.5	5.68	0.00		Inicial
2/8/2022	3	9	4.9	10.00	8.18	0.82	10.700	0.406	406	285	121	8.23	4.08	2.02	Inicial
10/8/2022	8	7	4.9	10.00	24.33	2.43	11.136	0.436	436	315	121	3.09	3.39	0.91	Inicial

Figura 6.6 Datos del riego del Lisímetro 7

Cálculo de ETo diario mediante el método Penman Monteith

Fecha	Temperatura °C	Punto de rocío °C	Velocidad del viento (Km/h)	Temp_max	Temp_min	Humedad relativa %	Velocidad del viento m/s	Rad solar (W/m2)	Rad solar (MJ/m2)	ETo (mm/día)
lunes, 11 de julio de 2022	22.33	19.73	4.33	21.00	21.00	85.15	1.20	86.50	7.47	1.7
martes, 12 de julio de 2022	22.10	19.80	4.00	21.00	20.00	85.90	1.11	73.90	6.38	1.6
miércoles, 13 de julio de 2022	22.90	19.88	4.79	21.00	21.00	84.65	1.33	129.40	11.18	2.2
jueves, 14 de julio de 2022	23.15	19.92	4.70	20.00	20.00	83.06	1.31	164.26	14.19	2.6
viernes, 15 de julio de 2022	22.71	20.10	4.96	21.00	21.00	84.98	1.38	111.03	9.59	2
sábado, 16 de julio de 2022	23.20	20.19	4.48	21.00	21.00	83.57	1.24	134.23	11.60	2.3
domingo, 17 de julio de 2022	23.11	20.22	4.76	20.00	20.00	83.22	1.32	101.04	8.73	1.9
lunes, 18 de julio de 2022	22.98	20.03	4.39	21.00	20.00	83.91	1.22	159.28	13.76	2.5
martes, 19 de julio de 2022	22.84	19.57	5.13	20.00	20.00	82.41	1.43	144.05	12.45	2.4
miércoles, 20 de julio de 2022	23.34	19.95	5.74	20.00	20.00	81.99	1.59	221.96	19.18	3.2
jueves, 21 de julio de 2022	23.00	19.19	5.75	21.00	21.00	80.19	1.60	223.83	19.34	3.4
viernes, 22 de julio de 2022	22.95	19.81	4.28	23.00	22.00	83.21	1.19	113.47	9.80	2.2
sábado, 23 de julio de 2022	22.83	19.77	3.38	21.00	21.00	82.85	0.94	131.70	11.38	2.3
domingo, 24 de julio de 2022	23.77	19.71	4.60	22.00	22.00	78.67	1.28	205.74	17.78	3.3
lunes, 25 de julio de 2022	23.53	19.54	5.91	21.00	21.00	78.75	1.64	212.07	18.32	3.3
martes, 26 de julio de 2022	24.06	20.29	4.30	21.00	21.00	80.32	1.19	164.34	14.20	2.7
miércoles, 27 de julio de 2022	25.09	20.85	4.40	22.00	21.00	78.21	1.22	191.36	16.53	3.1
jueves, 28 de julio de 2022	24.92	21.07	4.95	22.00	22.00	80.11	1.38	196.43	16.97	3.2
viernes, 29 de julio de 2022	23.07	20.61	5.66	23.00	22.00	86.29	1.57	98.04	8.47	2
sábado, 30 de julio de 2022	24.35	21.04	3.43	21.00	21.00	81.54	0.95	137.44	11.87	2.4
domingo, 31 de julio de 2022	23.65	20.42	5.25	22.00	22.00	83.08	1.46	138.81	11.99	2.5
lunes, 1 de agosto de 2022	23.45	20.22	4.97	23.58	23.31	82.35	1.38	129.81	11.22	2.5
martes, 2 de agosto de 2022	23.22	20.03	5.00	23.29	23.11	82.68	1.39	137.91	11.92	2.3
miércoles, 3 de agosto de 2022	22.79	20.15	4.22	22.91	22.70	85.84	1.17	68.26	5.90	1.6
jueves, 4 de agosto de 2022	24.59	21.14	4.16	24.74	24.47	81.59	1.15	151.83	13.12	2.8
viernes, 5 de agosto de 2022	23.72	20.79	4.98	23.83	23.60	84.00	1.38	112.18	9.69	2.2
sábado, 6 de agosto de 2022	24.33	20.68	5.17	24.48	24.13	81.00	1.44	225.01	19.44	3.7
domingo, 7 de agosto de 2022	23.26	20.32	4.42	23.38	23.11	84.06	1.23	94.43	8.16	2
lunes, 8 de agosto de 2022	23.22	20.53	4.55	23.29	23.13	84.74	1.26	76.31	6.59	1.8
martes, 9 de agosto de 2022	22.94	20.32	5.00	23.02	22.84	85.48	1.39	113.25	9.78	2
miércoles, 10 de agosto de 2022	23.79	20.29	4.99	23.93	23.70	81.41	1.39	187.16	16.17	3.2

Datos semanales obtenidos de la Tina A de evaporación

Fecha	Lectura	Evaporación (cm)	Evaporación (mm)	Semanal (mm)
11/7/2022	21	-	-	8
12/7/2022	20.9	0.1	1	
13/7/2022	20.9	0	0	
14/7/2022	20.8	0.1	1	
15/7/2022	20.7	0.1	1	
16/7/2022	20.5	0.2	2	
17/7/2022	20.3	0.2	2	
18/7/2022	20.2	0.1	1	
19/7/2022	19.8	0.4	4	27
20/7/2022	19.5	0.3	3	
21/7/2022	18.9	0.6	6	
22/7/2022	18.3	0.6	6	
23/7/2022	18	0.3	3	
24/7/2022	17.8	0.2	2	
25/7/2022	17.5	0.3	3	
26/7/2022	17.1	0.4	4	
27/7/2022	16.5	0.6	6	25
28/7/2022	16	0.5	5	
29/7/2022	15.9	0.1	1	
30/7/2022	15.6	0.3	3	
31/7/2022	15.4	0.2	2	
1/8/2022	15	0.4	4	
2/8/2022	14.8	0.2	2	
3/8/2022	14.4	0.4	4	
-	21	-	-	26
4/8/2022	20.7	0.3	3	
5/8/2022	20.4	0.3	3	
6/8/2022	20	0.4	4	
7/8/2022	19.5	0.5	5	
8/8/2022	19	0.5	5	

Datos de contenido de humedad inicial del suelo

LISIMETRO	CAPA	CAPACIDAD DE CAMPO (%H)	PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE (%H)
L 1	CAPA 1	38.80	17.64
	CAPA 2	35.39	16.09
	CAPA 3	33.43	15.19

L 2	CAPA 1	38.80	10.19
	CAPA 2	35.39	10.34
	CAPA 3	33.43	9.80
L 3	CAPA 1	38.80	10.19
	CAPA 2	35.39	10.34
	CAPA 3	33.43	9.80
L 4	CAPA 1	38.93	17.69
	CAPA 2	38.60	17.54
	CAPA 3	34.71	15.78
L 5	CAPA 1	39.21	17.82
	CAPA 2	38.85	17.66
	CAPA 3	34.48	15.67
L 6	CAPA 1	39.21	17.82
	CAPA 2	38.85	17.66
	CAPA 3	34.48	15.67
L 7	CAPA 1	39.21	17.82
	CAPA 2	38.85	17.66
	CAPA 3	34.48	15.67

Cronograma de actividades

Fecha	Actividades
20-24 de Junio	Cosecha del cultivo de maíz saliente
27-1 de Julio	Cosecha y corte del cultivo de maíz saliente
4-6 de Julio	Rumo de rastrojos del cultivo de maíz saliente para su quema
7 de Julio	Colocación de las mangueras del sistema de riego en cada hilera y
8 de Julio	Se removió el suelo en los lisímetros y fertilización con DAP el lote
9 de Julio	Siembra de frejol de palo en el lote y el lisímetro
11 de Julio	Siembra del maíz Advanta en el lote y el lisímetro, toma de datos
14 de Julio	Aplicación del primer riego de germinación
15 de Julio	Recolección del agua a drenar de los lisímetros
18 de Julio	Aplicación del segundo riego de germinación
19 de Julio	Recolección del agua a drenar de los lisímetros, toma de
20 de Julio	Recolección del agua a drenar de los lisímetros
22 de Julio	Toma de muestras de suelo y transplante de frejol a los lisímetros
23 de Julio	Recolección de agua a drenar de los lisímetros
25 de Julio	Fertilización con Urea y Muriato de potasio en el lote de maíz
29 de Julio	Fumigación para el cogollero
1 de Agosto	Desmalezado del cultivo de maíz
2 de Agosto	Desmalezado del cultivo de maíz
3 de Agosto	Toma de datos de las variables agronómicas
8 de Agosto	Fertilización inorgánica a maíz, fumigación para el cogollero y aplicación de un fungicida agrícola

7. ANEXOS



Foto 1 Infiltrómetro nivelado



Foto 2 Juego de tensiómetros en L4



Foto 3 Quema de rastrojos



Foto 4 Quema de rastrojos



Foto 5 Colocación de mangueras



Foto 6 Frejol germinado en bandeja



Foto 7 Maíz germinado en campo



Foto 8 Maíz en la unidad experimental



Foto 9 Cultivo en bloque de lisímetro



Foto 10 Maíz en bloque de lisímetro



Foto 11 Medidor de clorofila



Foto 12 Agua drenada del lisímetro