

UNIVERSIDAD NACIONAL

“SANTIAGO ANTUNEZ DE MAYOLO”

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



“DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE USO CONSUNTIVO DEL AGUA PARA EL CULTIVO DE LA QUINUA (*Chenopodium quinoa Willd*), MEDIANTE EL MÉTODO DEL LISIMETRO”

Presentado por:

NIRIAN YENIFER TARAZONA SANTOS.

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERA AGRÓNOMA.**

Huaraz, Perú

2017.



UNIVERSIDAD NACIONAL
SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO
"Una Nueva Universidad para el Desarrollo"
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
CIUDAD UNIVERSITARIA DE SHANCAYÁN TELEFAX 043 426 588 - HUARAZ - ANCASH - PERÚ



ACTA DE CONFORMIDAD

Los Miembros del Jurado de Tesis que suscriben y habiendo realizado la Sustentación de Tesis presentado por la Bachiller Nirian Yenifer Tarazona Santos, denominado "Determinación del Coeficiente de Uso Consuntivo del Agua para el Cultivo de la Quinoa (*Chenopodium Quinoa Willd*), Mediante el Método del Lisímetro", y sustentada el día 26 de Mayo del 2017, autorizada por Resolución Decanatural N° 226-2017-UNASAM-FCA/D de fecha 18 de Mayo del 2017.

En consecuencia queda en condición para ser calificado apto por el Consejo de Facultad y Consejo Universitario, Recibir el Título de Ingeniero Agrónomo de Conformidad con la Ley Universitaria y el Estatuto de la Universidad.

Huaraz, 26 de Mayo del 2017

Ing. M. Sc. BARRETO RODRIGUEZ JUAN F
PRESIDENTE

Ing. M. Sc. TINOCO MEYHUAY TITO M.
SECRETARIO

Ing. M. Sc. COTOS VERA-JAVIER A.
VOCAL

Dr. Ing. M. Sc. DIAZ SALAS ABELARDO M.
ASESOR



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

Los Miembros del Jurado Calificador que suscriben, reunidos para estudiar y escuchar la sustentación de Tesis presentado por la Bachiller en Ciencias de Agronomía, Señorita Nirian Yenifer Tarazona Santos denominado "Determinación del Coeficiente de Uso Consuntivo del Agua para el Cultivo de la Quinoa (*Chenopodium Quinoa Willd*), Mediante el Método del Lisímetro", escuchadas las respuestas y observaciones formuladas, lo Declaramos:

Con el calificativo de (*) APROBADA
 MUY BUENO

En consecuencia queda en condición de ser calificado APTO por el Consejo de Facultad y Consejo Universitario, y recibir el Título de INGENIERO AGRÓNOMO, DE CONFORMIDAD CON LA Ley Universitaria y el Estatuto de la Universidad.

Huaraz, 26 de Mayo del 2017


Ing. M. Sc. BARRETO RODRIGUEZ JUAN F.
PRESIDENTE


Ing. M. Sc. TINOCO MEYHUAY TITO
SECRETARIO


Ing. M. Sc. COTOS VERA JAVIER A.
VOCAL


Dr. Ing. M. Sc. DIAZ SALAS ABELARDO M.
ASESOR

(*) De acuerdo con el reglamento de Tesis, estas deben ser calificadas con términos de: SOBRESALIENTE, MUY BUENO, BUENO O REGULAR.

DEDICATORIA

A Dios, por su infinita bondad y amor.

A mis Hermanas y Hermano, por su comprensión e incondicional apoyo.

A mi Papá, porque siempre será el amor de mi vida.

A mi Mamá, porque es la rosa de mi jardín.

A mis Sobrinas, por ser la risa fresca e inocente.

AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios por permitirme concluir con bien mi proyecto, gracias a la Universidad Nacional “Santiago Antúnez de Mayolo”, especialmente a mi Facultad Ciencias Agrarias por prestarme sus instalaciones para la conducción de mi proyecto.

Agradezco a mi Asesor por su apoyo constante, su paciencia y comprensión; así mismo agradezco a todos los docentes que tuvieron su participación directa o indirectamente en mi proyecto.

Finalmente agradezco a quien lea este apartado, ya que al hacerlo permite que mis experiencias e investigaciones puedan ser un aporte y el inicio de una base para dar inicio a nuevas investigaciones y continuar con estas investigaciones para poder tener una base de información local siempre en mejora de nuestra agricultura.

Todo lo que puedes cambiar es a tí mismo

Pero a veces, eso lo Cambia todo.

Gary Goldstei

INDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO.....	VI
INDICE GENERAL.....	VIII
ÍNDICE DE CUADROS.....	XIV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XV
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XVI
RESUMEN.....	XVII
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	4
II. REVISIÓN LITERARIA.....	5
2.1 ANTECEDENTES DE ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	5
2.2 NECESIDAD DE AGUA POR LOS CULTIVOS.....	7
2.2.1 Evaporación.....	8
2.2.2 Transpiración.....	9
2.2.3 Evapotranspiración.....	10
2.2.3.1 Evapotranspiración del Cultivo de Referencia (ET _o).....	12
2.2.3.2 Evapotranspiración del Cultivo Real (ETR o ET _c).....	13

2.2.4	Uso Consuntivo	14
2.3	FACTORES QUE AFECTAN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN	15
2.3.1	Variables Climáticas	15
2.3.2	Factores de Cultivo	15
2.3.3	Manejo y Condiciones Ambientales	15
2.4	COEFICIENTE DE CULTIVO (Kc)	16
2.4.1	Fases de desarrollo del cultivo	17
2.5	MÉTODOS DE CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN	20
2.5.1	Método Experimental.	20
2.5.1.1	<i>Balace de Agua en el Suelo.</i>	21
2.5.1.2	<i>Lisímetros.</i>	21
2.5.2	Métodos Indirectos o Empíricos	22
2.5.2.1	<i>Blaney–Criddle</i>	25
2.5.2.2	<i>Radiación</i>	25
2.5.2.3	<i>Hargreaves</i>	26
2.5.2.4	<i>Turc</i>	28
2.5.2.5	<i>Jensen y Haise</i>	28
2.6	EL AGUA EN EL SUELO	30
2.6.1	Disponibilidad del Agua en el Suelo	30
2.6.1.1	Saturación	30
2.6.1.2	Capacidad de Campo (CC)	30
2.6.1.3	Punto de marchitez permanente (PMP)	31
2.6.1.4	Humedad aprovechable total (HAT)	31
2.6.1.5	Fracción del agua del suelo fácilmente disponible (F)	32
2.6.1.6	Humedad fácilmente aprovechable (HFA)	32

2.6.1.7 Volumen de agua disponible total en la capa de raíces. -----	33
2.6.2 Métodos para Determinar el Contenido de Humedad del Suelo. -----	33
2.6.2.1 Método directo o gravimétrico. -----	33
2.6.2.2 Método indirecto o de los tensiómetros. -----	34
2.6.3 Movimiento del Agua en el Suelo. -----	34
2.7 LISIMETROS	35
2.7.1 Definiciones -----	35
2.7.2 Objetivos de los Estudios Lisimétricos -----	35
2.7.3 Tipos de Lisímetros -----	36
2.7.4 Consideraciones para el Establecimiento y Funcionamiento de Lisímetros -----	37
2.8 CULTIVO DE LA QUINUA -----	38
2.8.1 Taxonomía -----	38
2.8.2 Historia -----	38
2.8.3 Importancia -----	38
2.8.4 Descripción Botánica -----	39
2.8.4.1 Raíz -----	39
2.8.4.2 Tallo -----	39
2.8.4.3 Hojas -----	39
2.8.4.4 Inflorescencia -----	40
2.8.4.5 Flores -----	40
2.8.4.6 Frutos -----	41
2.8.4.7 Semilla -----	41
2.8.5 Fases fenológicas -----	41
2.8.5.1 Emergencia -----	42

2.8.5.2 Dos hojas verdaderas-----	42
2.8.5.3 Cuatro hojas verdaderas-----	42
2.8.5.4 Seis hojas verdaderas-----	43
2.8.5.5 Ramificación-----	43
2.8.5.6 Inicio de panojamiento-----	43
2.8.5.7 Panojamiento -----	43
2.8.5.8 Inicio de floración -----	43
2.8.5.9 Floración -----	44
2.8.5.10 Grano lechoso-----	44
2.8.5.11 Grano pastoso-----	44
2.8.5.12 Madurez fisiológica -----	44
2.8.6 Requerimientos del Cultivo -----	45
2.8.7 Rendimiento De La Quinoa. -----	45
2.8.8 Tecnología Del Cultivo. -----	45
2.8.8.1 Preparación del terreno-----	45
2.8.8.2 labores culturales-----	46
2.8.9 Plagas y Enfermedades más Importantes-----	46
2.8.9.1 Insectos plaga-----	46
2.8.9.2 Enfermedades-----	47
III. MATERIALES Y MÉTODO	48
3.1 UBICACIÓN	48
3.1.1 Área de Estudio -----	48
3.1.2 Descripción del Área Experimental-----	48
3.1.2.1 <i>Análisis físico – químico del suelo</i> -----	49

3.2 MATERIALES Y EQUIPOS-----	50
3.2.1 Equipos-----	50
3.2.1.1 Lisímetro-----	50
3.2.1.2 Tensiómetro-----	51
3.2.1.3 Pluviómetro-----	51
3.2.1.4 Estación meteorológica-----	51
3.2.2 Materiales-----	52
3.2.2.1 Cultivo de Quinoa-----	52
3.2.2.2 Cultivo de Rye Grass-----	52
3.2.2.3 Variables climáticas-----	52
3.3 METODOLOGÍA.-----	56
3.3.1 Instalación del Experimento-----	56
3.3.2 Calibración del Tensiómetro-----	56
3.3.3 Instalación del Tensiómetro-----	57
3.3.4 Conducción de los Cultivos en el Experimento-----	57
3.3.4.1 Cultivo de Quinoa-----	57
3.3.4.2 Cultivo de Rye Grass-----	59
3.3.5 Aplicación de Riegos-----	59
3.3.5.1 Riego inicial-----	59
3.3.5.2 Frecuencia de riego-----	60
3.3.6 Balance Hídrico en el Lisímetro-----	60
3.3.7 Determinación de la Evapotranspiración del Cultivo de Referencia – ETo (Rye grass).-----	61
3.3.7.1 Determinación por el método del lisímetro-----	61
3.3.7.2 Estimación con métodos indirectos-----	62

3.3.8 Cálculos Estadísticos Efectuados-----	62
3.3.8.1 fórmula adecuada -----	63
3.3.9 Determinación de la Evapotranspiración del Cultivo de Quinoa (ETR) Por El Método del Lisímetro -----	63
3.3.10 Estimación del Coeficiente de Cultivo (Kc)-----	64
3.3.11 Curvas del Coeficiente de Cultivo (Kc)-----	66
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	67
4.1 DESARROLLO DE LOS CULTIVOS.-----	67
4.1.1 Cultivo de Quinoa -----	67
4.1.2 Cultivo de Rye Gras -----	67
4.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA ESTIMADA CON LISIMETRO. -- -----	68
4.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL ESTIMADA CON FÓRMULAS EMPÍRICAS. -----	68
4.3.1 Para el período de 10 años (2007 – 2016) -----	68
4.3.2 Para el Período de Estudio (Mayo 2016 – Octubre 2016)-----	68
4.4 DEFINICIÓN DE LA FÓRMULA EMPÍRICA ADECUADA PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL.-----	75
4.5 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE LA QUINUA. -----	79
4.6 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CULTIVO (Kc) DE LA QUINUA.-- -----	80
V. CONCLUSIONES	84
VI. RECOMENDACIONES	85
VII. BIBLIOGRAFIA	86

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1 Ecuaciones Empíricas Utilizadas Para Este Proyecto.....	24
CUADRO 2: Análisis Físico–Químico del Suelo Experimental.....	49
CUADRO 3: Características del Cultivo.....	53
CUADRO 4: Datos climatológicos para un período de diez años (2007 – 2016). Estación meteorológica, “Santiago Antúnez de Mayolo”- SENAMHI.....	54
CUADRO 5: Datos climatológicos para el período en estudio Mayo – Octubre 2016. Estación meteorológica, “Santiago Antúnez de Mayolo” - SENAMHI.....	55
CUADRO 6: Etapas Fenológicas del Cultivo de Quinoa (<i>Chenopodium quinoa willd</i>), Variedad Salcedo INIA.....	65
CUADRO 7 Evapotranspiración de Referencia (ET _o) con lisímetros.	68
CUADRO 8 Resultado de la Evapotranspiración Potencial Calculada Empleando Fórmulas (mm/día) para un Período de Diez Años (2007 – 2016).....	70
CUADRO 9 Datos Climatológicos, Evapotranspiración calculada (Fórmula) y medida (Lisímetro) para el período en estudio (Mayo 2016 – Octubre 2016).....	72
CUADRO 10 Resultado de la Evapotranspiración calculada (ETP) y la Evapotranspiración lisimétrica (ET _o) en mm/ día con sus respectivos promedios para el período en estudio (Mayo 2016 – Octubre Del 2016).....	74
CUADRO 11 Porcentaje de error de la Evapotranspiración Potencial Calculada (ETP) con las fórmulas respecto a la Evapotranspiración de referencia lisimétrica (ET _o).....	77
CUADRO 12 Registro mensual de la Evapotranspiración del cultivo de Quinoa (ETR) ..	79
CUADRO 13 Registro del coeficiente de cultivo del cultivo de Quinoa (K _c) por estado fenológico	80

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: Esquematación de una estoma durante el proceso de transpiración	10
FIGURA 2: Evapotranspiración	12
FIGURA 3: Repartición de la evapotranspiración en evaporación y transpiración durante el periodo de crecimiento de un cultivo anual	11
FIGURA 4: Curvas real y teórica del coeficiente de cultivo	20
FIGURA 5: Gráfica comparativa de la evapotranspiración calculada con fórmulas (mm/día) para un promedio de 10 AÑOS (2007 – 20016)	71
FIGURA 6: Gráfica comparativa de ETo (Lisimétrica) y ETP (Ecuaciones) para el período en estudio (Mayo – Octubre)	73
FIGURA 7: Curva del coeficiente de uso consuntivo (Kc) del cultivo de quinua por períodos	82
FIGURA 8: Curva del coeficiente de uso consuntivo (Kc) del cultivo de quinua mensual	83

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (RYE GRASS) MEDIDA
- ANEXO B:** EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE QUINUA MEDIDA
- ANEXO C:** DATOS METEOROLÓGICOS.
- ANEXO D:** EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL EMPLEANDO FÓRMULAS
- ANEXO E:** DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE HUMEDAD
- ANEXO F:** PANEL FOTOGRÁFICO DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS.
- ANEXO G:** PANEL FOTOGRÁFICO DE LA INSTALACIÓN DE LOS LISÍMETROS.
- ANEXO H:** PANEL FOTOGRÁFICO DE LA INSTALACIÓN DE LOS TENSÍOMETROS.
- ANEXO I:** PANEL FOTOGRÁFICO DE LA CONDUCCIÓN DEL CULTIVO DE QUINUA Y RYE GRASS.
- ANEXO J** PLANOS

RESUMEN

El presente trabajo se realizó en el Distrito de Independencia – Ancash, dentro de las instalaciones de la ciudad universitaria, en la parcela experimental de la Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela Profesional de Agronomía – localizada en el barrio de Shancayán, ubicada a una altura de **3,079 m.s.n.m.**

El área donde se desarrolló el experimento fue de 6 m^2 , aproximadamente a 10 metros de la estación meteorológica del SENAMHI.

Se realizó el cálculo y análisis de la evapotranspiración potencial (ETP) histórica para un promedio de diez años (2007- 2016) utilizando las fórmulas tomadas en el presente estudio (Radiación, Hargreaves con Temperatura, Hargreaves con Radicación, Turc, Jensen Haise, Blaney Criddle y Thornthwaite), haciendo uso de los datos climatológicos de la Estación Meteorológica “Santiago Antúnez de Mayolo”.

En dicha área se instaló un lisímetro de drenaje o volumétrico con un cultivo de referencia que fue el rye grass, usado para medir la evapotranspiración de referencia (ET_o). Para medir la evapotranspiración real (ETR) se instalaron tres lisímetros de drenaje o volumétricos con el cultivo de quinua, los cuales se ubicaron simétricamente.

Relacionando los valores de la evapotranspiración del cultivo de quinua (ETR), con la evapotranspiración del cultivo de referencia rye-grass (ET_o), ambos determinados por lisímetros de drenaje o volumétricos, se realizaron los cálculos del coeficiente de uso consuntivo (K_c) para las diferentes fases de crecimiento.

Se registraron las lecturas de riego, drenaje y precipitación diarias en los lisímetros.

Los resultados obtenidos con las fórmulas de Radiación, Hargreaves con Temperatura, Hargreaves con Radicación, Turc, Jensen Haise, Blaney Criddle y Thornthwaite fueron comparados con la evapotranspiración medida experimentalmente con el rye grass, de lo

cual se deduce que la ecuación de Turc y Thornthwaite son las que se ajustan más a la evapotranspiración del cultivo de referencia medido in-situ para la zona de Huaraz.

La evapotranspiración del cultivo de quinua varía en función de la fase de desarrollo de las plantas obteniéndose un resultado de 900.366 mm de lámina hídrica por el método lisimétrico. Los valores del coeficiente de uso consuntivo (K_c), varían en el rango de 0.54 a 1.16, siendo las necesidades mínimas en la fase inicial ($K_c = 0.54$), alcanzando su máximo, en la fase de media estación ($K_c = 1.16$), para posteriormente descender en el estado final que es el de maduración ($K_c = 0.70$).

ABSTRACT

The present work was realized in the District of Independence – Ancash, inside the facilities of the university campus, in the experimental plot of the faculty of Agrarian Sciences, Professional School of Agronomy – located in Shancayán neighborhood, located to a height of 3,079 m. s. n. m.

The area where the experiment developed was 6 m², approximately to 10 meters of the meteorological station of SENAMHI

There was realized the calculation and analysis of the potential evapotranspiration historical (ETP) for an average of ten years (2007-2016) using the formulae taken in the present study (Radiation, Hargreaves with Temperature, Hargreaves with Radiation, Turc, Jensen Haise, Blaney Criddle and Thornthwaite), making use of the climatological information of the Meteorological Station “Santiago Antúnez de Mayolo“

In the above mentioned area a volumetric drainage lisímetro settled or with a reference cultivation that the rye grass used to measure the evapotranspiration of reference (ET_o).

To measure the evapotranspiration of the cultivation of reference rye-grass (ET_o), both determined for lysimeter of drainage or volumetric, there were realized the calculations of the coefficient of consumptive use (K_c) for the different growth phases. There registered the readings of irrigation, drainage and precipitation newspaper in the lysimeter.

The results obtained with the formulae of Radiation, Hargreaves with Temperature, Hargreaves with Radiation, Turc, Jensen Haise, Blaney Criddle and Thornthwaite were compared by the evapotranspiration measured experimentally to the rye gass, of which it is defined that the equation of Turc and Thornthwaite there are those who fit more to the evapotranspiration of the cultivation of reference measured in-situ for the Huaraz area.

The evapotranspiration of the cultivation of quinoa changes according to the phase of development of the plants there being obtained a result of 900. 366 mm of water plate by the method lisimétrico. The values of the coefficient of consumptive use (K_c), they change in the status from 0. 54 to 1. 16, being the minimal needs in the initial phase (K_c = 0. 54), reaching its maximum, in the phase of half a station (K_c = 1. 16), later to descend in the final state that is that of maturation (K_c = 0. 70)

I. INTRODUCCIÓN

El Perú cuenta con 7'125 008 Has cultivables de las cuales 3 296 008,11 Has se ubican en la sierra (50.7% en seco y 38.4% bajo riego), áreas en las que el agua de riego se maneja con una eficiencia que varía del 20 al 30 %.

Las prácticas de riego en el Perú no han cambiado al no modificarse los procedimientos de los agricultores, para fijar la fecha de inicio de sus riegos y continuar fijo el calendario agrícola, sin tener en cuenta las variaciones climáticas que se producen anualmente.

En la actualidad el agua como un recurso importante en la agricultura, enfrenta una realidad bastante crítica a nivel mundial, nacional y local debido a la crisis climática, por lo que es de necesidad dar un uso eficiente a este recurso muy importante en la vida.

Es notable desde hace años atrás que la región Ancash viene sufriendo un constante cambio climático, con radiaciones fuertes y con precipitaciones variables en el transcurso de las campañas agrícolas formando los denominados “veranillos”, causando daño en la agricultura.

La quinua (*Chenopodium quinoa Willd*), es un cultivo originario de la zona andina, adaptado a condiciones agroecológicas extremas (sequías, heladas), es uno de los alimentos completos y balanceados que existen en nuestro territorio por su alto contenido en vitaminas, aminoácidos, ácidos grasos insaturados (omega 3, 6,9), minerales y proteínas.

La demanda de quinua tiene dos destinos bien diferenciados: el auto sostenimiento y el mercado de productos funcionales.

En la planificación y ejecución de los proyectos agrícolas, el conocimiento y manejo de los recursos hídricos juega un papel importante, en los que se consideran en primer lugar, la disponibilidad del agua, factor que depende del régimen pluviométrico (intensidad y distribución de las lluvias) y de las fuentes naturales de la zona; en segundo lugar los requerimientos de agua por los cultivos.

El uso de fertilizantes, variedades mejoradas, productos fitosanitarios, mejores prácticas de labranza y otras técnicas, han aumentado la productividad de las cosechas; pero frecuentemente las necesidades de agua para restituir las pérdidas por evaporación, transpiración y percolación profunda, puede ser un factor limitante; por consiguiente, el control de humedad del suelo, la dotación oportuna y el volumen adecuado de agua a aplicar es la clave del éxito de la agricultura bajo riego. De lo que se concluye que el agua debe usarse eficientemente para obtener los máximos rendimientos por cada unidad de volumen de agua empleada por unidad de área.

Las necesidades hídricas del cultivo se relacionan con la evapotranspiración (ET), proceso del sistema suelo-planta que combina la pérdida de agua del suelo por evaporación y de la planta por transpiración. Según la FAO (Allen et al., 1998), la evapotranspiración de referencia (ET_o) se define como la máxima cantidad de agua que pierde un cultivo hipotético de referencia de una altura de 0.12 m, una resistencia de la superficie de 70 s m⁻¹ y un albedo de 0.23 m, similar a la ET que ocurre en una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, que crece activamente y que está bien regada.

A las necesidades máximas de agua de un cultivo se denomina “Uso Consuntivo” o Evapotranspiración, que dependen de las condiciones climáticas, condiciones de humedad del suelo y estado de desarrollo de un cultivo, así mismo su estado de sanidad.

Sin embargo, las necesidades de agua de un proyecto, por lo general se puede estimar si se conoce la evapotranspiración potencial de un cultivo de referencia (ET_o) y aplicándole a esta evapotranspiración un factor denominado coeficiente de uso consuntivo (K_c), que relaciona la demanda de agua de un cultivo (ET_R) en cualquier etapa de desarrollo, desde la siembra hasta la cosecha.

Entre los métodos usados para medir la evapotranspiración en una superficie cultivada destaca el del lisímetro que mide la evaporación del suelo desnudo o la evapotranspiración del área sembrada con un cultivo. Los lisímetros son grandes depósitos llenos de suelo, generalmente instalados en el campo para representar las condiciones ambientales naturales, y en el que las condiciones del sistema agua-suelo-planta pueden regularse a conveniencia y medirse con más precisión que en el perfil natural de suelo (Hillel, 1980). Este método aporta una medición directa de la evapotranspiración del cultivo, y se usa frecuentemente para el estudio de efectos climáticos y para evaluar los métodos de estimación.

En el Perú, y particularmente en nuestra zona existen pocas investigaciones en lo referente a los estudios de necesidades de agua por los cultivos.

Por lo que las eficiencias de aplicación del agua y de los valores de evapotranspiración, no tienen uso práctico y aún se desconocen; si bien es cierto que existen en la literatura valores de K_c para muchos cultivos, pero se desconocen de los cultivos andinos como es el caso de la quinua, oca, mashua, etc. y sobre todo datos locales.

Un método más exacto para determinar los K_c , es sembrar los cultivos en lisímetros y obtener la evapotranspiración de los cultivos.

Se han ideado fórmulas que permitan predecir el volumen exacto de agua que se requiere para obtener una producción óptima de distintos cultivos. Estas fórmulas se refieren a las condiciones climáticas y geográficas propias de una zona dada. La transferencia de metodología para el empleo de las formulas, de una zona a otra muy distinta de aquella en la que han sido concebidas sigue siendo una problemática. Se requiere a menudo experimentos in-situ para probar y calibrar las fórmulas en un nuevo conjunto.

En el Capítulo II se detalla todo el marco teórico sobre este tema. En el Capítulo III se detalla toda la metodología desarrollada para cumplir los objetivos planteados en este trabajo.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Obtener los coeficientes de uso consuntivo (K_c) del agua para los diferentes estadios fenológicos del cultivo de Quinua a través de la relación ETR/ETP, mediante el método lisimétrico.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Estimar para las condiciones locales, las tasas de evapotranspiración potencial (ETP) a partir de diferentes fórmulas empíricas basadas en datos meteorológicos.

- Determinar la evapotranspiración del cultivo de quinua, mediante el método del lisímetro.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Uno de los aspectos más importantes en el desarrollo de los cultivos es el conocimiento de la evapotranspiración (ET) de un cultivo exento de enfermedades, debido a que la ET está íntimamente ligada al clima de cada localidad, es importante conocer cómo influyen en estos factores climáticos.

Actualmente en la región Ancash, no se dispone de información sobre la determinación de la evapotranspiración del cultivo y no se dispone de una información que se hayan realizado trabajos de la determinación de coeficiente de cultivo (Kc) para el cultivo de quinua por el método experimental para condiciones de nuestra localidad.

La importancia de la elección de un buen Kc para un cultivo, conlleva a que se obtenga un cálculo adecuado sobre el requerimiento de agua; con lo que se dotará a la planta en las diferentes etapas del período vegetativo, la dosis o volúmenes necesarios a través del riego.

En los sistemas de riego diseñados y construidos en nuestra zona, las demandas hídricas de cultivos obtenidos con Kc se adoptaron de otras regiones o países en donde factores como edáficos, climáticos, radiación solar, suelo, entre otros, son casi similares y hasta diferente a nuestros país, región o provincia por lo tanto no se tomó en cuenta las diferencias climatológicas de este medio con los lugares donde se obtuvo este Kc.

Al obtener el Kc relacionado y determinado en esta zona, se consiguió calcular para el cultivo de la quinua el consumo de agua más eficiente.

En tal sentido y por las razones expuestas, la presente investigación, busca determinar un coeficiente de cultivo de Quinua, relacionando directamente a los diferentes factores climatológicos y edáficos que existen en nuestra zona.

II. REVISIÓN LITERARIA

2.1 ANTECEDENTES DE ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE EVAPOTRANSPIRACIÓN

A continuación se presenta experiencias realizadas en diferentes lugares del Perú y Bolivia. Así encontraremos a diversos investigadores dedicados a estos temas.

En Bolivia, Choquecallata, Vacher, Fellmann e Imaña (1989 – 1990) realizaron estudios para determinar la evapotranspiración máxima (ETM) del cultivo de quinua mediante lisímetros; así mismo estimar y comparar entre sí, para las condiciones locales, las tasas de evapotranspiración potencial (ETP) a partir de diferentes fórmulas basadas en datos meteorológicos y obtener los coeficientes de cultivo de la quinua a través de la relación ETM/ETP.

De lo cual concluyeron que la evapotranspiración máxima (ETM) del cultivo de la quinua fue de 3,64 mm/día (promedio estacional), evolucionando de acuerdo al desarrollo fenológico del cultivo, alcanzando sus más altos niveles durante la floración e inicio de grano lechosos con 4,54 y 4,71 mm/día. La ETM total acumulada (134 días) fue de 488 mm.

La evapotranspiración potencial (ETP) promedio anual para la zona de estudio según la fórmula de Penmann fue de 3,40 mm/día con su equivalente de 1241 mm/año. La fórmula empírica que mejor se aproximó a la de Penmann fue la de Blaney Criddle original, en tanto que la menos precisa fue la de Thornthwaite que llegó a subestimar la ETP en un 54 % respecto a Penmann. El coeficiente de cultivo (Kc de la quinua fue de 0,87 promedio estacional, con valores que evolucionan de acuerdo al desarrollo fenológico alcanzando sus más altos niveles durante la floración e inicio de grano lechoso con 1,08 y 1,14 respectivamente.

García, Dirk y Jacobsen (2002) mencionan que el propósito de sus estudios, fue desarrollar un procedimiento para calcular apropiadamente los requerimientos de riego de un típico cultivo andino, basados en datos obtenidos de experimentos previos y bajo las condiciones de disponibilidad de datos de la zona. Los resultados obtenidos demuestran que, debido a las extremas condiciones de la zona, los sistemas de riego deben ser diseñados con cuidado. Señalan en un reporte preliminar acerca de la fórmula de Penman-Monteith la cuál fue calibrada en relación a la evapotranspiración de rey grass obtenido con lisímetros para las condiciones climáticas de un punto representativo del altiplano boliviano.

La evapotranspiración de referencia obtenida con la fórmula de Penman-Monteith presentó valores alejados de la realidad cuando fue obtenida usando datos directos y se determinó que se requerían correcciones, las cuales se centraron en la humedad atmosférica. Los valores de K_c fueron determinados usando los valores ya obtenidos de ET_c de quinua y aquéllos calibrados de ET_o . La curva de K_c sigue el mismo patrón de cualquier cultivo comercial, presentando una fase inicial con un $K_c = 0.52$, de desarrollo, de madurez con un $K_c = 1.00$ y senescencia con un $K_c = 0.70$. La ET_c (mm/día) de quinua determinada en lisímetros de drenaje en Patacamaya acumulada (110 días), fue de 450 mm/día durante la gestión agrícola 1989-1990.

León (1981) realizó estudios en Cajamarca sobre la determinación de uso consuntivo (K_c) de los cultivos para seis cultivos, concluyendo que las necesidades de agua (ETR), varía en forma gradual de una fase a otra, teniendo la curva del coeficiente de uso consuntivo la misma tendencia, con requerimientos mínimos durante la fase inicial, alcanzando su máximo en la fase de media estación (fructificación) y disminuyendo en el estado final, obteniendo resultados para el cultivo de quinua con un período vegetativo de 206 días, un K_c inicial: 0.50, K_c de desarrollo: 1.15, K_c de mediados de temporada: 1.10 y K_c de maduración: 0.66.

Jurado (1981) en su investigación llevada a cabo en Huancayo, sobre la determinación del uso consuntivo de cinco cultivos andinos, obtuvo que los coeficientes de K_c para todos los cultivos en la etapa inicial fue de 0.47. Así mismo, encontró valores de K_c máximo de 1.22 para la Mashua, 1 para la Oca, 0.86 para el

Olluco, 1.09 para el Tarwi y 1.2 para la Quinoa, coincidiendo dichos valores en la etapas de desarrollo y fructificación.

Desde la etapa de maduración hasta la cosecha obtuvo que el Kc para la Mashua, Oca, y Olluco es de 0.32, mientras que para el Tarwi y Quinoa es de 0.42 y 0.43 respectivamente, dichos coeficientes los obtuvo también por el Método Lisimétrico para el cálculo de Evapotranspiración potencial (ETP) y la Evapotranspiración Real.

2.2 NECESIDAD DE AGUA POR LOS CULTIVOS.

Castañon (2000) comenta que un riego eficiente debe aportar el agua al cultivo en el momento y en la cantidad que este requiere. Se deben evitar tantos aportes excesivos o insuficientes, con la consiguiente merma de producción. Por ello conocer las necesidades de agua de los cultivos es vital.

Dichas necesidades que generalmente se denominan evapotranspiración de cultivo (ETc) dependen de los parámetros climáticos, de la disponibilidad de agua, del tipo y variedad del cultivo, de la densidad de siembra y del estado de su desarrollo. La planta a lo largo de su ciclo fenológico no presenta la misma sensibilidad a la disponibilidad de agua.

Vásquez et al. (S.F) un aspecto fundamental en la Ingeniería de Riegos es lo referente a la cuantificación del consumo o necesidad de agua de los cultivos, elemento básico que se utiliza para dimensionar las obras de infraestructura de riego, así como para planificar y programar el riego de los cultivos a nivel parcelario.

Doorembos y Pruitt (1979) consideran que las necesidades de riego se refieren a la cantidad de agua y al momento de su aplicación con el objeto de compensar el déficit de humedad del suelo durante el período vegetativo de un cultivo dado. Estas necesidades de riego quedan determinadas por la evapotranspiración del cultivo menos el agua que han aportado las precipitaciones, las aguas subterráneas, la acumulación de agua en el suelo debido a aportaciones anteriores. Se expresan en milímetros por períodos vegetativos, a efectos de planificación global y de evaluación del balance hídrico de la cuenca, del proyecto o del campo.

2.2.1 Evaporación

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor). El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como: lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada.

Para cambiar el estado de las moléculas del agua de líquido a vapor se requiere energía. La radiación solar directa y, en menor grado, la temperatura ambiente del aire, proporcionan esta energía.

La fuerza impulsora para retirar el vapor de agua de una superficie evaporante es la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie evaporante y la presión de vapor de agua de la atmósfera circundante. A medida que ocurre la evaporación, el aire circundante se satura gradualmente y el proceso se vuelve cada vez más lento hasta detenerse completamente si el aire mojado circundante no se transfiere a la atmósfera o en otras palabras no se retira de alrededor de la hoja. El reemplazo del aire saturado por un aire más seco depende grandemente de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento son parámetros climatológicos a considerar al evaluar el proceso de la evaporación.

Cuando la superficie evaporante es la superficie del suelo, el grado de cobertura del suelo por parte del cultivo y la cantidad de agua disponibles en la superficie evaporante son otros factores que afectan el proceso de la evaporación. Lluvias frecuentes, el riego y el ascenso capilar en un suelo con manto freático poco profundo, mantienen mojada la superficie del suelo. En zonas en las que el suelo es capaz de proveer agua con velocidad suficiente para satisfacer la demanda de la evaporación del suelo, este proceso está determinado solamente por las condiciones meteorológicas.

Sin embargo, en casos en que el intervalo entre la lluvia y el riego es grande y la capacidad del suelo de conducir la humedad cerca de la superficie es reducida, el contenido en agua en los horizontes superiores disminuye y la superficie del suelo se seca. Bajo estas circunstancias, la disponibilidad limitada del agua ejerce un control sobre la evaporación del suelo. En ausencia de cualquier fuente de reabastecimiento de agua a la superficie del suelo, la evaporación disminuye rápidamente y puede cesar casi totalmente en un corto lapso de tiempo (FAO N°56 1998:1).

La evaporación es un factor meteorológico muy importante para todos los estudios de recursos hídricos pues afecta la producción hídrica de las cuencas, la capacidad de los embalses, el uso consuntivo de los cultivos y la producción de las reservas subterráneas (Guevara E., 1994:100).

2.2.2 Transpiración

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de las estomas. Estas son pequeñas aberturas en la hoja de la planta a través de las cuales atraviesan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmósfera (**Figura 1**). El agua, junto con algunos nutrientes, es absorbida por las raíces y transportada a través de la planta.

La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con la atmósfera es controlado por la abertura estomática.

Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales.

La transpiración, igual que la evaporación directa, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser considerados en su determinación. El contenido de agua del suelo y la capacidad del suelo de conducir el agua a las raíces también determinan la tasa de transpiración, así como la salinidad del suelo y del agua de riego.

La tasa de transpiración también es influenciada por las características del cultivo, el medio donde se produce y las prácticas de cultivo.

Diversas clases de plantas pueden tener diversas tasas de transpiración. Por otra parte, no solamente el tipo de cultivo, sino también su estado de desarrollo, el medio donde se produce y su manejo, deben ser considerados al evaluar la transpiración (FAO N°56 1998:3).

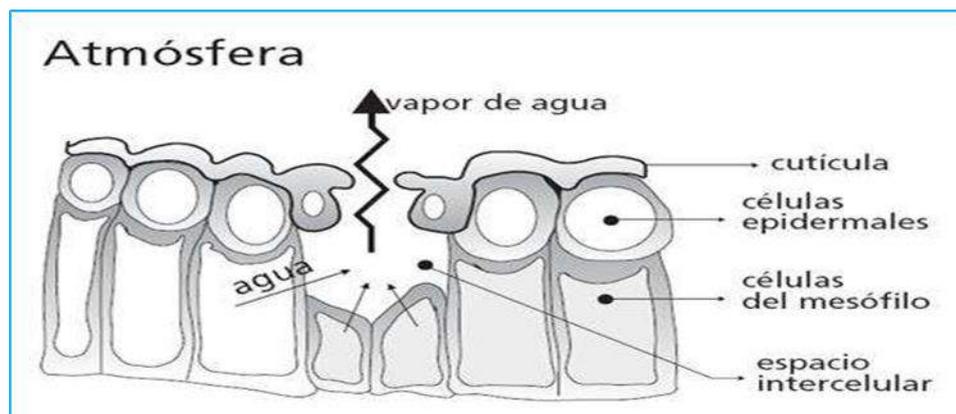


Figura 1 Esquemización de una estoma durante el proceso de transpiración.

Fuente: FAO (1998).

2.2.3 Evapotranspiración

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal. En el momento de la siembra, casi el 100% de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90% de la ET ocurre como transpiración, tal como se muestra en la figura 2 (FAO N°56 1998:3).

García (1992) sostiene que la evapotranspiración, es la pérdida de agua hacia la atmósfera por evaporación desde cualquier superficie evaporante (suelo húmedo, superficie de agua, etc.) y transpiración de la vegetación existente en dicha superficie o medio. Como constituyente la cantidad de agua que pasa hacia la atmósfera desde la superficie terrestre, es importante para el desarrollo del balance hídrico.

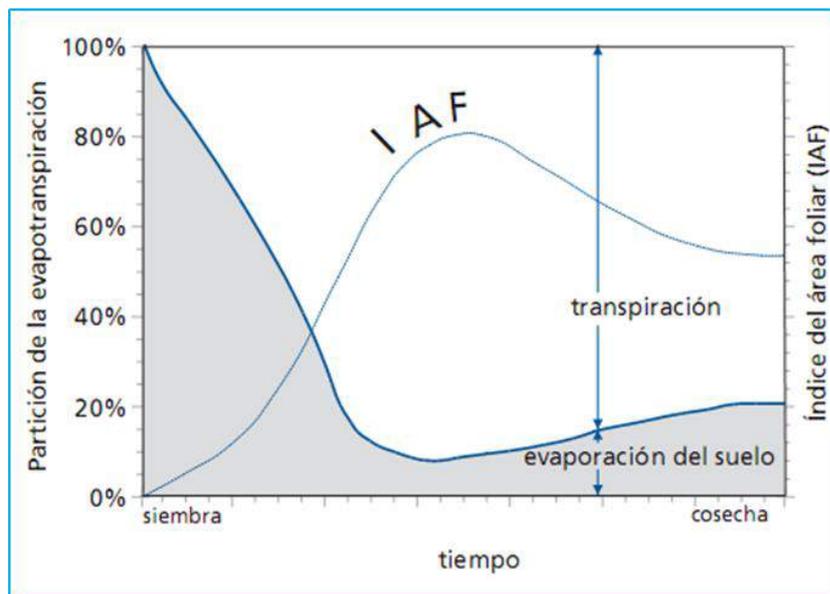


Figura 2 Repartición de la evapotranspiración en evaporación y transpiración durante el periodo de crecimiento de un cultivo anual.

Fuente: FAO (1998).

De Santa Olalla (2005) manifiesta que en el “ICID multilingual dictionary, define que la evapotranspiración es la pérdida total de agua de una cobertura vegetal, bajo forma de vapor a través de la evapotranspiración durante un intervalo de tiempo dado”.

Como se observa la **figura 3**, la evapotranspiración del cultivo (ETR) según Allen et al., (1998) representa la cantidad de agua que, por el proceso de transpiración la planta emite como vapor de agua a la atmósfera más la cantidad de agua que se pierde por evaporación desde la superficie del suelo.



Figura 3 Evapotranspiración.

Fuente: Elaboración Propia.

2.2.3.1 Evapotranspiración del Cultivo de Referencia (ET_o)

Este concepto fue introducido a finales de 1970 y comienzos de 1980 por ingenieros e investigadores de riego, como consecuencia del vacío teórico del concepto de evapotranspiración potencial. (ET_p) (*Irmak y Haman, citado por Esmeral, 2011*).

Dado que el concepto de (ETP) es difuso, pues cada tipo de planta evapotranspira una cantidad de agua diferente, la Organización Mundial de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) en su Guía para las necesidades hídricas de los cultivos, de Doorembos y Pruitt (1975, 1977) adopta el concepto de evapotranspiración de referencia y lo definen como: “La tasa de evaporación en mm/día de una extensa superficie de pasto (grama) verde de 8 a 15 cm de altura, uniforme, de crecimiento activo, que sombrea completamente la superficie del suelo y que no sufre de escasez de agua”.

En su publicación la FAO (1998) menciona que: La tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia, y se denomina ET_o.

La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas y con una altura asumida de 0.12 m. No se recomienda el uso de otras denominaciones como ET potencial, debido a las ambigüedades que se encuentran en su definición.

El concepto de evapotranspiración de referencia se introdujo para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo y de las prácticas de manejo. Debido a que hay una abundante disponibilidad de agua en la superficie de evapotranspiración de referencia, los factores del suelo no tienen ningún efecto sobre ET. El relacionar la ET a una superficie específica permite contar con una referencia a la cual se puede relacionar la ET de otras superficies. Además, se elimina la necesidad de definir un nivel de ET para cada cultivo y periodo de crecimiento. Se pueden comparar valores medidos o estimados de ET en diferentes localidades o en diferentes épocas del año, debido a que se hace referencia a ET bajo la misma superficie de referencia.

Los únicos factores que afectan ET_o , son los parámetros climáticos. Por lo tanto, ET_r es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. ET_r expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo.

La ET_r se puede calcular utilizando datos meteorológicos FAO N°56 (1998:7,15).

Lazo (2006) menciona que la evapotranspiración de un cultivo de referencia, tiene la característica de ser un cultivo densamente poblado, de crecimiento uniforme y tamaño pequeño, con el desarrollo de su ciclo vegetativo bajo condiciones óptimas de humedad cercana a la capacidad de campo.

2.2.3.2 Evapotranspiración del Cultivo Real (ETR o ETc)

Vasquez y Chang (1992) mencionan que: La evapotranspiración real es la tasa de evaporación y transpiración de un cultivo exento de enfermedades, que crece en un campo extenso (uno o más hectáreas) en condiciones óptimas de suelo fertilidad y suministro de agua. La ET_c es llamada también Uso consuntivo. Su cálculo se efectúa mediante la relación que se muestra en la Ec. 01

La FAO (1998) ha examinado la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar. Las mismas se refieren a la evapotranspiración de un cultivo que se desarrolla libre de enfermedades, con buena fertilización, que crece en un campo

extenso bajo condiciones óptimas de humedad en el suelo y el cual alcanza su producción total bajo ciertas condiciones climáticas.

Los efectos de las distintas condiciones del tiempo atmosférico fueron incluidos en la E_{To} . Los efectos de las características que distinguen la superficie cultivada de la superficie de referencia se integran en el coeficiente del cultivo (K_c). Para determinar ETR se multiplica E_{To} por el coeficiente del cultivo.

La evapotranspiración de un cultivo será diferente a la del cultivo de referencia (E_{To}) en la medida en la que sus características de cobertura del suelo, propiedades de la vegetación y resistencia aerodinámica difieran de las correspondientes al pasto.

2.2.4 Uso Consuntivo

Aparicio (1994) lo define como la combinación de evapotranspiración y el agua que las plantas retienen para su nutrición. Esta última cantidad es pequeña en comparación con la evapotranspiración (aproximadamente representa solo el 1%). Por lo que los términos evapotranspiración y uso consuntivo se usan como sinónimos (Ver Ec. 01).

Lazo (2006) señala que la evapotranspiración es también conocida como uso consuntivo de los cultivos (Ver Ec. 01).

Olarte (1987) menciona que si la evapotranspiración se da en condiciones reales del medio, es decir, teniendo en cuenta las variaciones de humedad del suelo, con una cubierta vegetal incompleta, como sucede normalmente en la mayoría de los cultivos se conoce como Evapotranspiración Real (ETR) (Ver Ec. 01).

$$ETR = UC = Kc * E_{To} \quad (01)$$

Dónde:

ETR : Evapotranspiración real del cultivo considerado, (mm o cm).

UC : Uso Consuntivo.

K : Coeficiente que tiene en cuenta el efecto de la relación agua-suelo planta.

ET_o : Evapotranspiración de referencia.

2.3 FACTORES QUE AFECTAN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

La FAO (1998) menciona que el clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo son factores que afectan la evaporación y la transpiración.

2.3.1 Variables Climáticas

Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son:

- ✓ Radiación.
- ✓ Temperatura del aire.
- ✓ Humedad atmosférica.
- ✓ Velocidad del viento.

2.3.2 Factores de Cultivo

El tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo deben ser considerados cuando se evalúa la evapotranspiración de cultivos que se desarrollan en áreas grandes y bien manejadas.

2.3.3 Manejo y Condiciones Ambientales

Los factores tales como:

- ✓ Salinidad o baja fertilidad del suelo.
- ✓ Uso limitado de fertilizantes.
- ✓ Presencia de horizontes duros o impenetrables en el suelo.
- ✓ Ausencia de control de enfermedades y de parásitos y el mal manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración.

Otros factores que se deben considerar al evaluar la ET son:

- ✓ La cubierta del suelo, la densidad del cultivo y el contenido de agua del suelo.

Se debe considerar adicionalmente:

- ✓ La gama de prácticas locales de manejo que actúan sobre los factores climáticos y de cultivo afectando el proceso de ET.
- ✓ Las prácticas del cultivo.

- ✓ El método de riego pueden alterar el microclima, afectar las características del cultivo o afectar la capacidad de absorción de agua del suelo y la superficie de cultivo.
- ✓ Una barrera rompe vientos reduce la velocidad del viento y disminuye la tasa de ET de la zona situada directamente después de la barrera. El efecto puede ser significativo especialmente en condiciones ventosas, calientes y secas aunque la evapotranspiración de los mismos árboles podría compensar cualquier reducción en el campo. Cuando las condiciones de campo difieran de las condiciones estándar, son necesarios factores de corrección para ajustar ETc (ETc aj). Estos factores de ajuste reflejan el efecto del ambiente y del manejo cultural de las condiciones de campo.

2.4 COEFICIENTE DE CULTIVO (Kc)

Según FAO (2006), en el enfoque del coeficiente único del cultivo, los efectos de la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo son combinados en un coeficiente Kc único. Este coeficiente integra las diferencias en la evaporación en el suelo y en la tasa de transpiración del cultivo, entre el cultivo y la superficie del pasto de referencia. Como la evaporación en el suelo puede fluctuar diariamente como resultado de la lluvia o el riego, el coeficiente único del cultivo es solamente una expresión de los efectos promedios en el tiempo (múltiples días), de la evapotranspiración debido a que el coeficiente único Kc representa un promedio de la evaporación en el suelo y la transpiración, este procedimiento se utiliza para estimar ETc para períodos de tiempo semanales o mayores, a pesar de que los cálculos puedan realizarse a nivel diario. El coeficiente único Kc promediado en el tiempo se utiliza para estudios a nivel de planificación y para el diseño de sistemas de riego donde sea razonable y pertinente considerar los efectos promedios del humedecimiento del suelo. Este es el caso de los sistemas de riego por superficie y aspersión donde el intervalo entre riegos sucesivos es de varios días, generalmente de diez o más días. Por lo tanto, para un manejo típico del riego, es válido aplicar el procedimiento del coeficiente único, Kc promediado temporalmente.

El valor de ET es calculado a través del enfoque del coeficiente del cultivo, donde los efectos de las condiciones del tiempo atmosférico son incorporados en ETo y las características del cultivo son incorporadas en el coeficiente Kc, como se muestra en la Ecuación 02

Llamado también factor de cultivo, para Vasquez y Chang (1992) es un factor que indica el grado de desarrollo o cobertura del suelo por el cultivo del cual se quiere evaluar su consumo de agua.

El factor K_c , depende de las características anatómicas, morfológicas y fisiológicas de los cultivos y expresa la variación de su capacidad para extraer agua del suelo durante el ciclo vegetativo. El factor K_c está determinado por el volumen foliar de los cultivos. (Ver Ec. 02).

Castañón (sf) señala que la determinación del coeficiente de cultivo, que se puede efectuar experimentalmente, no es fácil, pues depende de numerosos factores característicos del cultivo (época de siembra, desarrollo, etc.), así como de la cantidad de agua del suelo.

Los valores de K_c suelen calcularse por meses o por períodos del ciclo en que su valor cambia. Los valores mensuales tienen el inconveniente de la variación de época de siembra que, evidentemente, modifica las necesidades de agua del cultivo. (Ver Ec. 02)

Salazar (1979) define al coeficiente de uso consuntivo K_c de un cultivo como la relación entre la llamada demanda de agua de este cultivo (mantenimiento a niveles óptimos de agua) y la demanda del cultivo de referencia. (Ver Ec. 02)

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (02)$$

Donde:

ET_c : Evapotranspiración Real del cultivo bajo consideración.

ET_o : Evapotranspiración del cultivo de referencia.

K_c : Coeficiente de uso consuntivo.

2.4.1 Fases de desarrollo del cultivo

Doorenbos y Pruitt (1976) indican que el período vegetativo se divide en cuatro fases, que son las siguientes:

a) Fase Inicial

Comprende el período de germinación y crecimiento inicial, cuando la superficie del suelo está cubierta apenas a nada por el cultivo, esta fase se inicia desde la siembra hasta que la cobertura vegetal llega al 10%.

Durante el período inicial el área foliar es pequeña y la evapotranspiración ocurre principalmente como evaporación en el suelo. Por lo tanto, el valor de K_c durante el período inicial (K_c ini) es alto cuando el suelo se encuentra húmedo debido al riego o lluvia, y es bajo cuando la superficie del suelo se encuentra seca. El tiempo que tardará el suelo en secarse dependerá del intervalo de tiempo entre eventos que humedezcan al suelo, del poder evaporante de la atmósfera (ET_o) y de la magnitud del evento de humedecimiento. (Ver figura 4) FAO N°56 (2006:96).

b) Fase de Desarrollo de Cultivo

Comprende desde el final de la fase inicial hasta que se llega a una cubierta sombreada efectiva completa del orden del 70 al 80%, lo cual no significa que el cultivo haya llegado a una altura de maduración.

A medida que el cultivo se desarrolla y sombrea cada vez más el suelo, la evaporación se verá cada vez más restringida y la transpiración gradualmente se convertirá en el proceso más importante. Durante la etapa de desarrollo del cultivo, el valor de K_c se corresponderá con la cantidad de la cobertura del suelo y el desarrollo de la planta. En general, si la superficie del suelo se encuentra seca, un valor de $K_c = 0,5$ se corresponderá con un valor de 25-40% de cobertura del suelo debido a los efectos del sombreado y debido al transporte en escala microscópica del calor sensible desde el suelo hacia la vegetación. Un valor de $K_c = 0,7$ generalmente se corresponderá con una cobertura del suelo de alrededor de 40-60%. Estos valores variarán dependiendo del cultivo, la frecuencia del humedecimiento y de si el cultivo utiliza más agua que el cultivo de referencia del pasto, cuando se encuentra en condiciones de cobertura completa (ósea, dependiendo de la arquitectura de la vegetación y la altura del cultivo en relación con el pasto de referencia). (Ver figura 4) FAO N°56 (2006:96).

c) Fase de Medios de Temporada

Comprende desde que se obtiene la cubierta sombreada efectiva completa hasta el momento de iniciarse la maduración, la cual se hace evidente por la decoloración o caída de las hojas.

La etapa de medios de temporada comprende el período de tiempo entre la cobertura completa hasta el comienzo de la madurez. El comienzo de la madurez está indicado generalmente por el comienzo de la vejez, amarillamiento o senescencia de las hojas, caída de las hojas, o la aparición del color marrón en el fruto, hasta el grado de reducir la evapotranspiración del cultivo en relación con la ET de referencia.

Durante la etapa de medios de temporada, el coeficiente K_c alcanza su valor máximo. El valor de K_c en esta etapa (K_c med) es relativamente constante para la mayoría de los cultivos y prácticas culturales (Ver figura 4) FAO N°56 (2006:96).

d) Fase de Finales del Período

Comprende desde el final de la fase anterior hasta que se llega a la plena maduración, recolección o cosecha.

La etapa final o tardía de crecimiento comprende el período entre el comienzo de la madurez hasta el momento de la cosecha o la completa senescencia. Se asume que el cálculo de los valores de K_c y ET finaliza cuando el cultivo es cosechado, secado al natural, alcanza la completa senescencia o experimenta la caída de las hojas. Si el cultivo es regado frecuentemente hasta el momento de su cosecha en fresco, el valor de K_c fin será alto. Si se permite la senescencia y secado del cultivo en el campo antes de la cosecha, el valor de K_c fin será bajo. (Ver figura 4) FAO N°56 (2006:97).

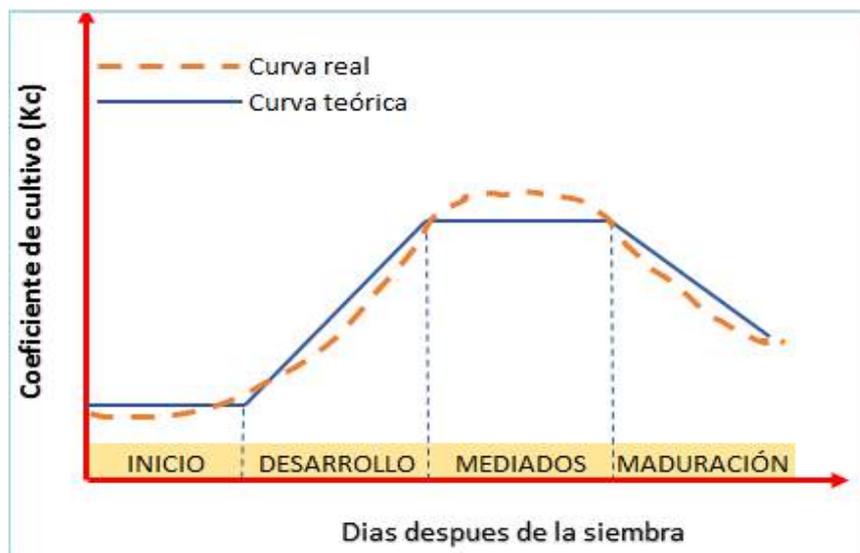


Figura 4 Curvas real y teórica del Coeficiente de Cultivo.

Fuente: Elaboración Propia.

2.5 MÉTODOS DE CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

Una vez comentados los aspectos teóricos básicos para el cálculo de la evapotranspiración y establecidas las diferencias entre los conceptos de evapotranspiración real y de referencia, se exponen los principales métodos de cálculo en función de las variables disponible.

Olarte (1987) varios procedimientos se han desarrollado para el cálculo de la ETP, de las necesidades de agua dentro de un período determinado de tiempo o del uso consuntivo de las explotaciones en áreas bajo riego, los que ordenadamente se pueden agrupar en:

- ✓ Métodos experimentales.
- ✓ Métodos basados en datos meteorológicos.
- ✓ Métodos indirectos basados en evaporímetros de cubeta.

2.5.1 Método Experimental.

FAO (2006) menciona que la evapotranspiración que ocurre en una superficie cultivada puede ser medida directamente a través de los métodos de:

- Balance de energía.
- Balance de agua en el suelo en campos cultivados.
- A través de Lisímetros

2.5.1.1 *Balance de Agua en el Suelo.*

Tuñón (2000) indica que el término de “balance de agua” fue definido por Thornthwaite en 1944 como la diferencia entre entradas de agua a partir de la precipitación y deshielo y a las salidas por evapotranspiración, recarga a los acuíferos y escorrentía.

Esencialmente toda el agua que cae en la superficie terrestre es devuelta a la atmósfera por evaporación y transpiración. Por tanto, es fácil estimar el balance de agua en el ciclo hidrológico. (Ver Ec. 03)

El uso de este balance se hace a cualquier escala; desde escala continental. Hasta para un árbol. Normalmente, se miden todas las demás variables y se despeja la evapotranspiración. La finalidad de este método depende de la precisión y veracidad de los parámetros medidos. Los errores de medida en la precipitación, la escorrentía y la variación del agua en el suelo son a menudo, muy significativos.

FAO (2006) el método consiste en evaluar los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo dentro de un determinado período de tiempo. (Ver Ec. 03)

$$ET = P + R - ES - D + C \pm \Delta SW \quad (03)$$

Donde:

- ET : Evapotranspiración.
- P : Precipitación.
- R : Riego.
- ES : Escurrimiento superficial.
- D : Percolación profunda.
- C : Capilaridad.
- ΔSW : Variación en el contenido del suelo.

2.5.1.2 *Lisímetros.*

Si se aísla la zona radicular del cultivo y se controlan los procesos que son difíciles de medir, los diversos términos en la ecuación del balance de agua en el suelo se pueden determinar con apreciable exactitud. Esto se hace en lisímetros que son tanques aislados llenados con suelo disturbado o no disturbado en los que el cultivo crece y se desarrolla.

- ***En lisímetros de pesaje de precisión***, la evapotranspiración se puede obtener con una exactitud de centésimos de milímetro, donde la pérdida de agua es medida directamente por el cambio de masa y períodos pequeños tales como una hora pueden ser considerados.

- ***En lisímetros de drenaje***, la evapotranspiración es medida por un período dado, restando la cantidad de agua de drenaje, recogida en el fondo de los lisímetros, de la cantidad total de agua ingresada. Un requerimiento de los lisímetros es que la vegetación dentro e inmediatamente fuera del lisímetro sea idéntica (la misma altura e índice de área foliar). Este requisito no se ha respetado normalmente en muchos estudios de lisimetría y ha dado lugar a datos seriamente desviados y poco representativos de ET_c y K_c .

Como los lisímetros son difíciles de manejar y caros de construir y además su operación y mantenimiento requieren de especial cuidado, su uso se restringe normalmente a trabajos investigativos FAO N°56 (2006:13).

2.5.2 Métodos Indirectos o Empíricos

Debido a la dificultad de obtener mediciones de campo precisas, ET se calcula comúnmente con datos meteorológicos. Una gran cantidad de ecuaciones empíricas o semi-empíricas se han desarrollado para determinar la evapotranspiración del cultivo o de referencia utilizando datos meteorológicos. Algunos de los métodos son solamente válidos para condiciones climáticas y agronómicas específicas y no se pueden aplicar bajo condiciones diferentes de las que fueron desarrolladas originalmente.

Numerosos investigadores han analizado el funcionamiento de los varios métodos del cálculo para diversas localidades. Como resultado de una Consulta de expertos llevada a cabo en mayo de 1990, el método FAO Penman-Monteith se recomienda actualmente como el método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia, ET_o . La ET del cultivo bajo condiciones estándar se determina utilizando los coeficientes de cultivo (K_c) que relacionan la ET_c con la ET_o FAO N°56 (2006:13).

Existen autores y datos climáticos que utilizaron predominantemente para estimar la evapotranspiración, aunque algunos de ellos utilizan varios datos climáticos. Se ha estimado que uno de los métodos más confiables es el de Penman, sin embargo tiene dificultades por el tipo de datos que requiere, además que tiene un cierto grado de complejidad para su instrumentación Cisneros (2003:56).

Gálvez y Naredo (1996), señalan que los métodos empíricos para la determinación de la ETo se obtienen principalmente con el uso de datos meteorológicos, además sus resultados solo son válidos si son previamente calibrados con medidas reales. La falta de datos básicos y las dificultades de medida en los métodos de campo, llevaron a desarrollar ecuaciones de ETP, con datos climáticos fácilmente accesibles. A continuación se detallan las ecuaciones empíricas utilizadas para este proyecto (Cuadro N° 01).

Cuadro 1 Ecuaciones Empíricas Utilizadas Para Este Proyecto

AUTOR	FORMULA	MEDIDAS NECESARIAS	OTROS DATOS
Hargreaves Radiación	$ET_o = 0.0075 * R_s * T^{\circ}F$	- Radiación solar. - Temperatura en °F.	
Hargreaves Temperatura	$ETP = MF * TMF * CH * CE$	- Temperatura. - Radiación solar.	La radiación solar se puede estimar con temperaturas máximas y mínimas.
Blanney Criddle modificado por la FAO	$f = p * [0.46 * T_m + 8.13]$	- Temperatura media	De la latitud por una tabla se obtiene n° teórico de horas sol. Coeficiente que depende del cultivo.
Jensen Haise	$ET = R_s (0.025T + 0.08)$	- Temperatura (min., máx., y medias del mes más cálido) altitud. - Radiación solar.	Tablas de n° teórico de horas sol. La radiación solar se puede estimar.
Thornthwaite	$ETP = 1.6 \left(\frac{L_1}{12}\right) \left(\frac{N}{30}\right) \left(\frac{T}{I}\right)^{a_1}$	- Temperatura	De la latitud por una tabla se obtiene n° teórico de horas del sol
Radiación	$ET_o = a + b * w * R_s$	- Radiación solar. - Horas de insolación. - Humedad relativa - Temperatura.	Radiación solar extraterrestre (tabla). Índice de ponderación (tabla).
Turc	$E = 0.40 (I_g + 50) \frac{T}{T + 15}$	- Temperatura. - Horas reales de sol.	De las horas de sol se obtiene la radiación global incidente (cal/cm ² . día) con una formula.

2.5.2.1 *Blaney–Criddle*

Este método fue desarrollado en 1950 para condiciones existentes en el oeste de los Estados Unidos, pero su uso se ha generalizado en regiones de distintas latitudes por su facilidad de cálculo. Este método permite estimar la ET mensual de cultivos agrícolas y de algunos tipos de vegetación natural, suponiendo que depende solamente de la temperatura, del número de horas del sol y del tipo de cultivo o vegetación Goehring Hube, Citado por Bochetti (2010).

La organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) realizó una adaptación de la fórmula de Blaney – Criddle para calcular la evapotranspiración de un cultivo referencia (Allen et al., 1998).

Dada por la siguiente expresión:

$$f = p * [0.46 * T_m + 8.13] \quad (04)$$

$$ETP = A + B*f \quad (05)$$

Dónde:

- ETP** = Evapotranspiración del cultivo de referencia en mm/día.
- T_m** = Temperatura media diaria en °C.
- P** = Porcentaje diario medio de horas diurnas anuales, obtenidas del cuadro D 1 en relación al mes dado y latitud del lugar.
- A, B** = Factores de ajuste, obtenidos del cuadro D 2 que depende de la velocidad de viento diurno, humedad relativa y la relación de brillo solar (n/N: n, Horas de insolación y N, Horas máximas diarias de fuerte insolación, ver cuadro D 3).

2.5.2.2 *Radiación*

Este método predice los efectos del clima sobre las necesidades de agua de los cultivos. Los resultados obtenidos por este método deben ser más fiables que los obtenidos con el método de Blaney-Criddle.

La relación que se sugiera para calcular la ET del cultivo de referencia a partir de datos de temperatura y de radiación Doorembos y Pruitt (1976) es la siguiente:

$$ET_o = a + b * w * R_s \quad (06)$$

Donde:

ET_o : Evapotranspiración del cultivo de referencia en mm/día.

R_s : Radiación solar expresada en el equivalente de evaporación en mm/día. Para lo cual se puede emplear la siguiente relación según FAO (1996):

$$R_s = (0.25 + 0.50 * \frac{n}{N}) * R_a$$

Dónde:

n / N : Es la relación entre horas reales y máximas posibles de fuerte insolación.

R_a : Radiación extraterrestre, se obtiene del cuadro D 4.

W : Índice de ponderación que depende de la temperatura y la altitud, ver cuadro D.5.

a, b : Coeficientes cuyos valores dependen de la humedad relativa media y la velocidad de los vientos diurnos. Se obtiene del cuadro D.6.

2.5.2.3 *Hargreaves*

Método diseñado por el Dr. George Hargreaves (1975) sugiere el cálculo de la evapotranspiración potencial a partir de datos medidos de temperatura media del aire, humedad relativa media y de datos de radiación solar.

En este método se analizan dos casos:

a) *En base a la radiación*

Salazar (1979) la describe como sigue:

$$ET_o = 0.0075 * R_s * T^{\circ}F \quad (07)$$

Donde:

ET_o = Evapotranspiración del cultivo de referencia en mm/día.

Rs = Radiación solar expresada en el equivalente de evaporación en mm/día. Para lo cual se puede emplear la siguiente relación según FAO (1975):

$$R_s = (0.25 + 0.50 * \frac{n}{N}) * R_a$$

Dónde:

n/N = Es la relación entre horas reales y máximas posibles de fuerte insolación.

R_a = Radiación extraterrestre equivalente (mm/día) que se obtiene del cuadro D 4.

b) *En base a la temperatura*

Ecuación obtenida en condiciones de altitud menores a 1,000 m.s.n.m., en el hemisferio norte y a temperaturas superiores a 10°C.

Es una de las ecuaciones comúnmente utilizada en el Perú.

$$ETP = MF * T^{\circ}F * CE * CH \quad (08)$$

Donde:

ET_o = Evapotranspiración del cultivo de referencia en mm/día.

MF = Factor mensual de latitud. (Se obtiene del cuadro D.7).

T^{°F} = Temperatura media mensual en °F.

$$T^{\circ}F = \frac{9}{5} * T^{\circ}C + 32$$

T^{°C} = Temperatura media mensual en ° C.

CE = Factor de corrección de la altura o elevación del lugar.

$$CE = 1.0 + 0.04 * \left(\frac{E}{2000}\right)$$

E = Altitud (m.s.n.m).

CH = Factor de corrección para la Humedad Relativa media.

Si: HR_{med} > 64%

$$CH = 0.166 (100 - HR_{med})^{1/2}$$

Si: $HR_{med} < 64\%$

$$CH = 1.00$$

HR_{med} = Humedad relativa media (%).

2.5.2.4 *Turc*

Este método propuesto por L. Turc en 1961 propone calcular la evapotranspiración de referencia para cada mes en función de la temperatura media mensual y la radiación solar recibida en la superficie, principal fuente de energía que alimenta el proceso de evapotranspiración, por ello se considera de mayor precisión que los anteriores.

$$ETP = K1 * K2 * (R_{sc} + 50) * \frac{TC}{(TC+15)} \quad (09)$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración Potencial en mm/día.

K1 = **0.40**, para meses de 30 y 31 días.

K1 = **0.37**, para el mes de febrero.

K2 = **1**, Si $HR_{med} > 50\%$

K2 = $1 + \frac{(50 - HR_{med})}{70}$, si $HR_{med} < 50\%$.

R_{sc} = Radiación solar expresada en cal/cm²/día.

TC = Temperatura media en (°C).

HR_{med} = Humedad relativa media en (%).

2.5.2.5 *Jensen y Haise*

Jensen y Haise (1963) recopilaron datos en regiones áridas del oeste de los estados unidos y desarrollaron una ecuación basada en la radiación y la temperatura este modelo fue contrastado en lisímetros en Nebraska y se muestra que tiende a sub estimar la ET cuando hay procesos de advección pero tiene una correlación muy buena cuando no se dan procesos advectivos

$$ET = Rs (0.025Tm + 0.08) \quad (10)$$

Donde:

ETP : Evapotranspiración Potencial en mm/día.

Rs : Radiación solar expresada en el equivalente de evaporación en mm/día.

Tm : Temperatura media diaria en °C.

2.5.2.6 Thornthwaite

Thornthwaite (1948) describió la importancia física y biológica de la ET en la clasificación climática y desarrolló una ecuación para la estima de la ETo. La fórmula se utiliza para calcular la ETo mensual en mm y se expresa de la siguiente forma

$$ETP = 1.6 \left(\frac{L_1}{12}\right) \left(\frac{N}{30}\right) \left(\frac{10 \cdot T}{I}\right)^{a_1} \quad (11)$$

Donde:

ETP : Evapotranspiración Potencial en mm/día.

L₁ : Número reales de sol al día.

N : Número de días al mes.

T : Temperatura media mensual en °C.

a₁ : $6.75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7.71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1.79 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0.49$

I : Índice de calor derivado de la suma de los 12 valores de los índices mensuales (i) obtenida a partir de:

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}$$

2.6 EL AGUA EN EL SUELO

El agua del suelo, como uno de los principales componentes hidrológicos, constituye la principal fuente de agua para los cultivos, por su capacidad de almacenarla y entregarla gradualmente, a medida que se requiere. El agua se infiltra en el suelo a través de los macroporos, para ser retenida en parte por los microporos y el resto percola a través del perfil hacia estratos más profundos o hasta el nivel freático.

El agua en el suelo no está libremente disponible, sino que esta retenida con una energía variable que debe ser superada por las plantas para poder ser incorporada y permitir la producción de materia seca. La cantidad de agua retenida es característica de cada suelo y en relación con sus propiedades físicas (Honorato, s.f.)

Mediante el riego, se busca restituir al suelo la cantidad de agua perdida por la evaporación y transpiración para brindarle al cultivo, condiciones apropiadas de humedad para su adecuado desarrollo (Vásquez et al., s.f.).

2.6.1 Disponibilidad del Agua en el Suelo

La cantidad de agua disponible en el suelo a ser utilizada por las plantas está comprendida entre el rango de humedad a capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) si se mantuviera el contenido de humedad del suelo a un nivel mayor que la CC, existe el peligro de que la falta de aire en el suelo sea un factor limitante para el normal desarrollo de las plantas (Vásquez et al., s.f.).

2.6.1.1 Saturación

Un suelo está saturado cuando todos sus poros están ocupados por agua. La tensión es inferior a 0.3 bares y el agua está sujeta a la fuerza de la gravedad. Esta situación no es óptima desde el punto de vista biológico, debido a la falta de oxígeno. Esta situación se produce después de un riego pesado o de una lluvia prolongada (Lazo, 2006 y Honorato, s.f.).

2.6.1.2 Capacidad de Campo (CC)

Se define como la máxima capacidad de retención de agua en un suelo sin problemas de drenaje, y que alcanza según la textura del suelo entre las 12 y 72

horas después de un riego pesado o una lluvia que permitió saturar momentáneamente al suelo; es decir, cuando la percolación y drenaje del agua gravitacional haya, prácticamente, cesado. Se define también como el contenido de humedad del suelo cuando la variación del contenido de humedad ($\Delta\theta$) con respecto al tiempo tiende a cero y para condiciones de evapotranspiración nula. También se puede decir que el contenido de humedad a capacidad de campo es aquel que corresponde a un estado energético del agua en el suelo de aproximadamente 0.33 bares para un suelo pesado (arcillosos) y de 0.10 bares para un suelo de textura gruesa (arenoso) (Vásquez et al., s.f.).

2.6.1.3 *Punto de marchitez permanente (PMP)*

Es el contenido de humedad del suelo en el cual la vegetación manifiesta síntomas de marchitamiento, caída de hojas, escaso desarrollo o fructificación, debido a un flujo muy lento de agua del suelo hacia la planta; y que, en promedio corresponde a un estado energético de 15 bares (Vásquez et al., s.f.). Donde la planta no puede extraer agua fácilmente entrando a un proceso irreversible de marchitamiento permanente (Lazo, 2006).

Es el límite inferior de la humedad, el cual la reserva de agua en el suelo está en el fin o se agotó, este punto es difícil de ser determinado debido a que involucra la conductividad hidráulica del suelo bien seco (García, 1992).

2.6.1.4 *Humedad aprovechable total (HAT)*

Viene a ser la cantidad de agua retenida por el suelo y de libre disponibilidad para las plantas (Lazo, 2006).

Matemáticamente es la diferencia que existe entre los contenidos de humedad del suelo a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) (Vásquez et al., s.f.).

$$\text{HAT (\%)} = \theta_{cc} (\%) - \theta_{pmp} (\%) \quad (12)$$

Donde:

HAT (%) : Humedad aprovechable total o agua disponible total en la capa enraizada del suelo (Vol. %).

θ_{cc} (%) : Contenido de humedad a capacidad de campo (Vol. %).

θ_{pmp} (%) : Contenido de humedad a punto de marchitez permanente (Vol. %).

2.6.1.5 *Fracción del agua del suelo fácilmente disponible (F)*

Aunque en teoría, el agua disponible para los cultivos en el suelo es la comprendida entre el contenido de humedad del suelo a capacidad de campo y a punto de marchitez permanente. En realidad no todas las especies tienen la capacidad de extraer esa cantidad de agua. Por tal motivo, se ha introducido un factor de carácter fisiológico, característico de cada especie, que indica la fracción de la humedad aprovechable a partir de la cual el cultivo empieza a manifestar síntomas fisiológicos adversos (clorosis, disminución del crecimiento, disminución del rendimiento, marchitez, etc.). A este concepto, se le conoce como “*fracción del agua del suelo fácilmente disponible*” (Vásquez et al., s.f.).

2.6.1.6 *Humedad fácilmente aprovechable (HFA)*

De la definición anterior se define que de la humedad aprovechable total (HAT), cada cultivo tiene la capacidad fisiológica de utilizar solamente una fracción. A esta fracción se le conoce como “*Humedad Fácilmente Aprovechable*”. (Vásquez et al., s.f.).

$$\text{HFA (\%)} = f * [\theta_{cc} (\%) - \theta_{pmp} (\%)] \quad (13)$$

Dónde:

f : Fracción del agua del suelo fácilmente aprovechable o disponible.

2.6.1.7 *Volumen de agua disponible total en la capa de raíces.*

Conociendo la lámina de agua aprovechable o disponible total, se calcula el volumen de agua disponible o aprovechable total en la capa de raíces. (Vásquez et al., s.f.).

$$La = \frac{[\theta_{cc} (\%) - \theta_{pmp} (\%)] * Dap. * Prof.}{100 * \rho_w} \quad (14)$$

Luego, el volumen de agua disponible está dado por la relación:

$$V_{AD} = 10 * La. \quad (15)$$

Dónde:

- La** : Lámina de agua disponible total. (mm.).
- Dap** : Densidad aparente del suelo (gr/cm³).
- Prof.** : Profundidad radicular (cm).
- ρ_w** : Densidad del agua, equivalente a 1 gr/cm³.
- V_{AD}** : Volumen de agua disponible total en la zona de raíces. (m³/ha).

2.6.2 **Métodos para Determinar el Contenido de Humedad del Suelo.**

La determinación del contenido de humedad puede hacerse mediante los métodos:

- **Directos:** Método gravimétrico.
- **Indirectos:** Método de la resistencia eléctrica, Método del tacto, Método del tensiómetro, Método de la sonda de neutrones, Método de la sonda TDR, Método de la absorción de rayos gamma, Método del bloque de yeso.

2.6.2.1 *Método directo o gravimétrico.*

Representa un método estándar y sirve de base para el empleo de los indirectos. Las muestras húmedas pesadas se secan en estufa durante 24 horas y a una temperatura de 105°C, para luego volver a ser pesadas; esta diferencia se divide con el peso del suelo seco, para obtener así el contenido de humedad basado en el peso seco. (Lazo, 2006)

2.6.2.2 Método indirecto o de los tensiómetros.

Las mediciones se realizan a fin de conocer el estado energético del agua del suelo. (Honorato, s.f.), utilizando unos dispositivos denominados tensiómetros. Conociendo este valor de la tensión, utilizamos las curvas de retención de la humedad del suelo, para la obtención de la humedad. (Lazo, 2006).

Un tensiómetro consiste de una cápsula porosa de cerámica, conectada a través de un tubo que se llena de agua a un vacuómetro o a un manómetro de mercurio. El agua se mueve hacia dentro y hacia afuera de la cápsula porosa debido a que está en contacto (por medio de los poros) con el agua del suelo y por lo tanto en equilibrio hidráulico. Cuando el suelo se seca, succiona agua de la copa porosa (gradiente hidráulico). En consecuencia, dentro del sistema se crea una tensión que aumenta gradualmente conforme el suelo se va secando. Cuando el suelo es humedecido por el riego o la lluvia, se invierte el sentido de la succión y el agua fluye de nuevo al interior de la copa, al mismo tiempo disminuye la lectura del tensiómetro. (Calavache s.f.).

2.6.3 Movimiento del Agua en el Suelo.

Desde el punto de vista de riego de los cultivos y del drenaje, la porción del suelo y de interés a ser analizada, es la zona radicular. En tal sentido, el proceso de entrada de agua al suelo – a la zona de raíces – ya sea proveniente de la lluvia, el riego o ascenso capilar, así como el proceso de salida ya sea mediante la transpiración, evaporación o percolación, constituyen los casos de importancia del movimiento del agua en el suelo.

En condiciones normales, en suelos no saturados se presentan los siguientes procesos o fenómenos relacionados con el movimiento del agua.

- Infiltración.
- Percolación del agua por debajo de las zonas de raíces.
- Redistribución del agua en el suelo, durante y después del periodo de infiltración.
- Movimiento del agua del suelo hacia las raíces.
- Ascensión capilar del agua desde el nivel freático y
- Evaporación del agua desde la superficie del suelo. (Vásquez et al., s.f.).

2.7 LISIMETROS

2.7.1 Definiciones

Según Mojarro (1975), cita a varios autores:

Lemon y otros (1957) cita: “El término lisímetro proviene del griego *lisis*” que significa desprendimiento o separación y se refiere al aparato que sirve para dar medidas directas del desprendimiento de agua por un cultivo a la atmósfera o al subsuelo.

Hillel y otros (1969) cita: Un lisímetro es un recipiente grande lleno de suelo, generalmente localizado en el campo y en el cual las condiciones suelo- agua-planta pueden ser reguladas y medidas más conveniente y precisamente que en el perfil de suelo natural.

El lisímetro es un aparato que mide en forma directa por procedimiento gravimétrico, la cantidad de agua consumida por un cultivo.

Trava (1972) menciona: Los lisímetros pueden ser definidos como estructuras que contienen una masa de suelo y diseñados de tal forma que permitan la medida del agua que drena a través del perfil del suelo.

Caballero (1973) cita: Un lisímetro es un recipiente en el cual se coloca un volumen de suelo y puede ser sembrado con especies vegetales y localizado aisladamente, junto con un área adyacente que lo circunde con el mismo suelo y vegetación.

Peña Peña (1974) cita: son estructuras adaptadas para contener suelo y acondicionadas para evaluar cuantitativamente los componentes del balance hidrológico, generalmente localizadas en campo para representar las condiciones naturales del suelo y el medio ambiente.

2.7.2 Objetivos de los Estudios Lisimétricos

Mojarro (1975), cita a Peña E., el cual reporta que Bavel y Myers (1962) resumieron los tipos de información que se puede obtener con los lisímetros:

- a) Proporcionan medidas directas de evaporación y transpiración de superficies del suelo sobre las cuales las plantas crecen, para permitir estudiar los factores que afectan esos procesos.

- b) Proporcionan una medición absoluta y precisa del flujo evaporativo como un proceso importante en investigación sobre la física de la atmosfera cerca del suelo.
- c) Sirve como estándar de comparación para evaluar métodos indirectos de medida de evapotranspiración o su predicción.
- d) Para medir exactamente las pérdidas de agua como resultado del secamiento superficial.
- e) Se utilizan los lisímetros para establecer relaciones matemáticas entre los datos climatológicos y los consumos de agua de los cultivos y se evaluarán los métodos indirectos de medida o predicción de la evapotranspiración de los cultivos.
- f) Servirá para realizar estudios de micro climatología agrícola y enfatizar la importancia del microclima en la evapotranspiración.
- g) Estudiar la lixiviación de los diferentes nutrientes del suelo.
- h) Como medio para determinar las cantidades de agua, fertilizantes y nutrientes que es necesario agregar al suelo.

2.7.3 Tipos de Lisímetros

Existen diferentes criterios para clasificar a los lisímetros entre los cuales se puede mencionar los siguientes:

- i. **Según su finalidad son:** Agronómicos, Hidrológicos e Hidrogeológicos.
- ii. **Según el estado del suelo dentro del recipiente son:** de Estructura Alterada o de Estructura Inalterada conocidos como monolíticos.
- iii. **Según el sistema de medición se clasifican en:** Lisímetros de drenaje (entradas y salidas volumétricas), Lisímetro de control de humedad y de Pesada (mecánico, hidráulicos, electrónicos y combinaciones de los anteriores).
- iv. **Según la colocación en el campo pueden ser:** Superficiales (Agrícolas o Hidrológicos) y Subterráneos (Hidrogeológicos).
- v. **Según su localización pueden ser:** Lisímetros de campo o de invernadero.

2.7.4 Consideraciones para el Establecimiento y Funcionamiento de Lisímetros.

A continuación se exponen un resumen de consideraciones que recomiendan los investigadores, Chang (1974) y Salazar (1979), citado por Mojarro (1975).

- ✓ El lisímetro debe ser grande y profundo para reducir los efectos de las paredes del tanque y para no interferir en el desarrollo radicular.
- ✓ Las condiciones físicas del suelo y del cultivo dentro y fuera del lisímetro deben ser las mismas.
- ✓ El estado de desarrollo, la densidad del cultivo dentro del lisímetro deben ser las mismas fuera de él y cada lisímetro debe estar rodeado del mismo cultivo.
- ✓ Para facilitar la percolación del agua dentro del sistema es necesario colocar una red filtrante.
- ✓ Los lisímetros no deben tener un borde mayor de 3 cm. para evitar de esta manera “el efecto de borde”, consiste en la transferencia de calor a través de las parcelas del lisímetro descubierto ocasionando una mayor evaporación y alteración de los resultados.
- ✓ El cultivo de referencia (rye-grass) debe mantenerse a una altura de 8 a 15 cm con densidad uniforme y fertilización adecuada.
- ✓ Los lisímetros deben de ser instalados en lugares próximos a una estación meteorológica y dentro de campos uniformemente cultivados.

2.8 CULTIVO DE LA QUINUA

Según: León Hanco, J.M. (2003:3 - 40).

2.8.1 Taxonomía

Este cultivo fue descrito por primera vez por el científico Alemán Luis Christian Willdnow.

Reyno	:	Vegetal
División	:	Fanerógamas
Clase	:	Dicotiledóneas
Sub-clase	:	Angiospermales
Orden	:	Centrospermales
Familia	:	Chenopodiaceas
Género	:	Chenopodium
Sección	:	Chenopodia
Subsección	:	Cellulata
Especie	:	Chenopodium quinua Willd.
Variedad	:	Salcedo INIA.

2.8.2 Historia

Es un cultivo muy antiguo de los andes, en 1970 el historiador Núñez indica que al norte de Chile en un complejo Arqueológico, encontró granos de quinua que datan de 3000 años a.c. Max Hule en 1919, historiador peruano indica que la quinua tiene una antigüedad de 5000 años a.c., en forma general, podemos indicar que en los diferentes lugares donde se han encontrado estos granos de quinua al ser analizados mediante el C.14 ratifican esta antigüedad. La singularidad encontrada es que mientras más antigua sea la semilla, se encontrara un mayor porcentaje de semillas de quinuas silvestres o ayaras (grano negro), lo que indica que el proceso de selección ha tenido varios siglos para poder lograrse una variedad.

2.8.3 Importancia

Constituye un aporte de nuestra cultura para todo el mundo, según estudiosos, este cultivo viene cobrando cada vez mayor importancia por su diversidad y utilidad en países con fragilidad de sus ecosistemas, sumando a sus bondades nutricionales que

satisface las necesidades de alimentación básica (seguridad alimentaria) del productor, además generando ingresos económicos por la venta de sus excedentes de producción.

2.8.4 Descripción Botánica

2.8.4.1 Raíz

El tipo de raíz varía de acuerdo a las fases fenológicas. Empieza con raíz pivotante terminando en raíz ramificado con una longitud de 25 a 30 cm., según el ecotipo, profundidad del suelo y altura de la planta; la raíz se caracteriza por tener numerosas raíces secundarias y terciarias.

2.8.4.2 Tallo

López (1999) manifiesta que el tallo de la quinua es casi cilíndrico en la parte del cuello y anguloso desde el comienzo de las ramificaciones, posee una epidermis cutinizada, corteza firme, compacta con membranas celulósicas, interiormente contiene una medula, que a la madurez desaparece. Su diámetro puede variar desde 1 a 8 cms. La corteza del tallo esta endurecida, mientras la médula es suave cuando las plantas son tiernas, y seca con textura esponjosa cuando maduran. Tienen diferentes coloraciones, entre las que se encuentran: verdes, verdes con axilares coloreadas o verdes con listas rojas.

2.8.4.3 Hojas

López (1999) son simples, enteras, esparcidas, glabras, pecioladas, sin estípulas, pinnatinervadas, presentan oxalatos de calcio o vesículas granulosas en el envés a veces en el haz; las cuales evitan la transpiración excesiva en caso de que se presentaran sequías. En la quinua, podemos notar que la hoja está formada por una lámina y un pecíolo, los pecíolos son largos acanalados y finos, las hojas son polimorfas, las hojas inferiores son de forma romboidal o de forma triangular y las hojas superiores son lanceoladas que se ubican cerca de las panojas. Pueden tomar diferentes coloraciones que van del verde al rojo o púrpura, lo que depende de la variedad.

2.8.4.4 *Inflorescencia*

Es de tipo racimosa y por la disposición de las flores en el racimo se le denomina como una panoja, por el hábito de crecimiento algunas inflorescencias se difieren por que pueden ser axilares y terminales.

En algunas variedades no se tiene una diferencia clara y pueden ser ramificadas teniendo una forma cónica, el eje principal de la inflorescencia es de forma angulosa o piramidal y tiene dos surcos, donde se ubican las flores. De acuerdo a la forma de panoja; se le considera amarantiforme, cuando sus glomérulos están insertados en el eje secundario y glomérulada, cuando los glomérulos están insertos en el eje primario o principal y toda la panoja tiene la forma, de un solo glomérulo. De acuerdo a la densidad de panoja que se presentan estas son considerados: compactas, semicompactas o semilaxas y laxas.

2.8.4.5 *Flores*

En una misma inflorescencia pueden presentar flores hermafroditas (perfectas), femeninas y androestériles (imperfectas).

Generalmente se encuentra 50 glomérulos en una planta y cada glomérulo está conformado por 18 a 20 granos aproximadamente.

Las flores son pequeñas de 1 a 2 mm de diámetro como en todas las Quenopodiáceas, son flores incompletas porque carecen de pétalos.

- *Fase de la Floración*

En los glomérulos la floración inicia en la parte apical y sigue hasta la base.

En cada parte del glomérulo se abren primero las flores hermafroditas y después las femeninas.

Cada flor está abierta de 5 a 13 días. A partir de la apertura de la primera flor, las demás flores se abren dentro de 15 días.

Así la fase total de floración de una panoja se demora 3 a 4 semanas.

- *Floración en el Transcurso del día*

La máxima intensidad de la floración en días de sol se presenta entre las 10.00 a.m. hasta 14.00 p.m., cuando 25 % a 40 % de flores están abiertas y cuando hay una fuerte radiación solar. Una floración de mínima intensidad se da en horas de lluvia. El pistilo es receptivo durante 2 horas.

2.8.4.6 Frutos

Es aquenio, el que se encuentra cubierto por el perigonio, que cuando se encuentra en estado maduro es de forma estrellada por los cinco tépalos que tiene la flor. El perigonio cubre solo una semilla y se desprende con facilidad al frotarlo; el color del grano está dado por el perigonio y se asocia directamente con el color de la planta, el pericarpio del fruto se encuentra pegado a la semilla y es donde se encuentra la saponina que es un glucósido de sabor amargo; se ubica en la primera membrana.

2.8.4.7 Semilla

Tiene forma lenticelada, que se encuentra envuelta por el perisperma, el tamaño de la semilla (grano) se considera grande cuando el diámetro es mayor a 2mm. (Var. salcedo-INIA); mediano de diámetro 1.8 a 1.9 mm. y pequeño menos de 1.7 mm de diámetro.

El pericarpio es suave en los ecotipos chilenos y duro en los demás ecotipos.

Directamente bajo del pericarpio está el episperma, una membrana delgada que cubre al embrión. El embrión está formado por los dos cotiledones y la radícula envuelve al perisperma en forma de anillo.

Cabe destacar que el embrión presenta la mayor proporción de la semilla (30 % de peso), mientras que en los cereales corresponde solamente al 1 %. De allí resulta el alto valor nutritivo de la quinua.

Las semillas vienen dispuestas en panojas, éstas tienen entre 15 y 70 cm, puede llegar a un rendimiento de 220 g de granos por panoja.

Los colores varían según la variedad y el estado fisiológico de la planta, así van del púrpura al rosado amarillo, del verde al amarillo pálido, etc.

Los granos, cuyo color también varía (blanco, gris, rosado).

2.8.5 Fases fenológicas

La duración de las fases fenológicas depende mucho de los factores medio ambientales que se presenta en cada campaña agrícola por ejemplo; si se presenta precipitación pluvial larga de 4 meses continuas (enero, febrero, marzo y abril), sin presentar veranillos las fases fenológicas se alarga por lo tanto el periodo vegetativo es largo y el rendimiento disminuye.

Cuando hay presencia de veranillos sin heladas, la duración de las fases fenológicas se acorta y el periodo vegetativo también es corto y el rendimiento es óptimo. También influye la duración de la humedad del suelo, por ejemplo en un suelo franco arcilloso, las fases fenológicas se alargan debido al alto contenido de humedad en el suelo o alta capacidad de retener agua; en cambio en un suelo franco arenoso sucede todo lo contrario.

2.8.5.1 *Emergencia*

Es cuando la plántula emerge del suelo y extiende las hojas cotiledóneas, pudiendo observarse en el surco las plántulas en forma de hileras nítidas, esto depende de la humedad del suelo; si el suelo está húmedo, la semilla emerge al cuarto día o sexto día de la siembra. En esta fase la planta puede resistir a la falta de agua, siempre dependiendo del tipo de suelo; si el suelo es franco-arcilloso. Si el suelo es franco-arenoso, puede resistir aproximadamente, hasta 7 días. También la resistencia depende mucho, del tipo de siembra; si es al voleo sin hacer surco, no resistirá a la sequía; si se siembra también al voleo pero dentro del surco, podrá resistir a la sequía.

2.8.5.2 *Dos hojas verdaderas*

Es cuando dos hojas verdaderas, extendidas que ya poseen forma lanceolada y se encuentra en la yema apical el siguiente par de hojas, ocurre a los 10 a 15 días después de la siembra y muestra un crecimiento rápido en las raíces. En esta fase la planta también es resistente a la falta de agua, pueden soportar de 10 a 14 días sin agua, siempre dependiendo de los factores ya mencionados en la emergencia.

2.8.5.3 *Cuatro hojas verdaderas*

Se observan dos pares de hojas extendidas y aún están presentes las hojas cotiledonales de color verde, encontrándose en la yema apical las siguientes hojas del ápice; en inicio de formación de yemas axilares del primer par de hojas; ocurre aproximadamente a los 25 a 30 días después de la siembra.

2.8.5.4 *Seis hojas verdaderas*

Se observan tres pares de hojas verdaderas extendidas y las hojas cotiledonales se tornan de color amarillento. Esta fase ocurre aproximadamente a los 35 a 45 días después de la siembra, en la cual se nota claramente una protección del ápice vegetativo por las hojas más adultas.

2.8.5.5 *Ramificación*

Se observa ocho hojas verdaderas extendidas con presencia de hojas axilares hasta el tercer nudo, las hojas cotiledonales se caen y dejan cicatrices en el tallo, también se nota presencia de inflorescencia protegida por las hojas sin dejar al descubierto la panoja, ocurre aproximadamente a los 45 a 50 días de la siembra. Durante esta fase se efectúa el aporque y fertilización complementaria.

Desde la fase de cuatro hojas verdaderas hasta fase se puede consumir las hojas en reemplazo a la espinaca.

2.8.5.6 *Inicio de panojamiento*

La inflorescencia se nota que va emergiendo del ápice de la planta, observado alrededor aglomeración de hojas pequeñas, las cuales van cubriendo la panoja en sus tres cuartas partes; ello puede ocurrir aproximadamente a los 55 a 60 días de la siembra, así mismo se puede apreciar amarillamiento del primer par de hojas verdaderas (hojas que ya no son fotosintéticamente activas) y se produce una fuerte elongación del tallo, así como engrosamiento.

2.8.5.7 *Panojamiento*

La inflorescencia sobresale con claridad por encima de las hojas, notándose los glomérulos que la conforman; así mismo, se puede observar en los glomérulos de la base los botones florales individualizados, puede ocurrir aproximadamente a los 65 a los 75 días después de la siembra.

2.8.5.8 *Inicio de floración*

Es cuando la flor hermafrodita apical se abre mostrando los estambres separados, aproximadamente puede ocurrir a los 75 a 80 días después de la siembra, en esta

fase es bastante sensible a la sequía con helada; se puede notar en los glomérulos las anteras protegidas por es perigonio de un color verde limón.

2.8.5.9 *Floración*

Se considera a esta fase cuando el 50% de las flores de la inflorescencia de las panojas se encuentran abiertas, puede ocurrir aproximadamente a los 90 a 80 días después de la siembra, esta fase es muy sensible a las heladas y granizadas, debe observarse la floración a medio día cuando hay intensa luminosidad solar, ya que en horas de la mañana y al atardecer se encuentra cerradas.

2.8.5.10 *Grano lechoso*

El estado de grano lechoso es cuando los frutos que se encuentran en los glomérulos de la panoja, al ser presionados explotan y dejan salir un líquido lechoso, aproximadamente ocurre a los 100 a 130 días de la siembra, en esta fase el déficit hídrico es sumamente perjudicial para el rendimiento disminuyéndolo drásticamente el llenado de grano (en suelos franco-arenoso), pero en suelos franco arcilloso es normal.

2.8.5.11 *Grano pastoso*

El estado de grano pastoso es cuando los granos al ser presionados presentan una consistencia pastosa de color blanco, puede ocurrir aproximadamente a los 130 a 160 días de la siembra, En esta fase ya no es necesario las precipitaciones pluviales (lluvia).

2.8.5.12 *Madurez fisiológica*

Es cuando el grano formado es presionado por las uñas, presenta resistencia a la penetración, aproximadamente ocurre a los 160 a 180 días a más después de la siembra, el contenido de humedad del grano varía de 14 a 16%, el lapso comprendido de la floración a la madurez fisiológica viene a constituir el periodo de llenado del grano, asimismo en esta etapa ocurre un amarillamiento y defoliación completa de la planta. En esta fase la presencia de lluvia es perjudicial porque hace perder la calidad y sabor del grano.

2.8.6 Requerimientos del Cultivo

2.8.6.1 Factores Ambientales

Las condiciones climáticas y el suelo tienen influencias muy marcadas en la producción y productividad de la quinua. El clima está determinado por una serie de factores tales como altitud, precipitación, temperatura, latitud, vientos, iluminación, etc.

Dado a su cultivo en zonas marginales de los andes altos, la quinua se enfrenta con altos riesgos ambientales como heladas, sequías prolongadas, granizo, vientos fuertes, suelos pobres y ácidos.

2.8.7 Rendimiento de la Quinua.

Los rendimientos varían en función a la variedad, fertilidad, drenaje, tipo de suelo, manejo del cultivo en el proceso productivo, factores climáticos, nivel tecnológico, control de plagas y enfermedades, obteniéndose entre 800 Kg. /Ha. a 1400 Kg./ha en años buenos. Sin embargo según el material genético se puede obtener rendimientos hasta de 3000 Kg. /Ha.

2.8.8 Tecnología del Cultivo.

2.8.8.1 Preparación del terreno

El cultivo de la quinua prospera más en suelos francos y bien drenados.

A) Roturación.

Se recomienda hacer inmediatamente después de cosechar el cultivo anterior para evitar la pérdida de materia orgánica (hojas, tallo, raíces, etc.) y cuando el suelo aun esta húmedo la cual ayudara la descomposición de la materia orgánica y eliminación de malezas. Se debe hacerse con arados de disco o reja (Vertedera fija o movable) a una profundidad de 20 cm a 25 cm y en algunos casos con yunta.

B) Rastrado.

Se recomienda hacer cuando el suelo esta húmedo y cuando las semillas de las malezas hayan germinado, para así poder eliminarlas, se rastra en forma cruzada para lograr una buena nivelación y mullido, del suelo logrando así la uniformidad en la germinación de las semillas.

C) Nivelación.

Solo se puede efectuarse empleando una cuchilla niveladora (grandes extensiones) o con rieles o tablonos cuando se siembra en pequeñas extensiones.

D) Surcado.

Se efectúa con surcos distanciados entre 35 a 40 cm. con la yunta, al cual se le adiciona ramas en forma transversal a la reja, para que efectúe una mejor expansión del surco, debiendo tener una profundidad aproximado de 20 cm.

E) Siembra.

Estas varían de acuerdo a la zona y las variedades que se van a cultivar (precoces o tardías), también depende de la presencia de la lluvia y del grado de humedad del suelo. Se recomienda de 2 a 3 cm de profundidad pudiendo llegar hasta 5cm.

F) Abonamiento.

Antes de aplicar fertilizantes siempre es recomendable hacer un análisis de suelo previo a la siembra para poder determinar la cantidad de nutrientes disponibles para el cultivo. Se fertiliza en dos partes: La primera parte en un 50% y la segunda parte antes del aporque lo que queda.

2.8.8.2 labores culturales

López (1999), recomienda hacer una primera deshierba entre los 30 días, luego un aporque a los 60 días, y 90 días el mismo que sirve como segunda deshierba.

2.8.9 Plagas y Enfermedades más Importantes

2.8.9.1 Insectos plaga

La producción y productividad de la quinua es limitada por la acción nociva de insectos plaga, estos dañan directamente cortando plantas tiernas, masticando y defoliando hojas, picando-raspando y succionando la savia vegetal, minando hojas y barrenando tallos, destruyendo panojas y granos, además, indirectamente las heridas provocadas por el daño del insecto permitirá la entrada de microorganismos y ocasionan enfermedades. Los insectos más importantes son:

“kcona kcona” y “panojero”. Se estima que las pérdidas que ocasionan los insectos son alrededor del 35%.

2.8.9.2 *Enfermedades*

El estudio de las enfermedades en quinua y su relación con organismos causales es relativamente reciente, los microorganismos patógenos (hongos, bacterias y otros) son nocivas a las plantas debido a que en su desarrollo evolutivo adquieren la capacidad de prescindir de las sustancias producidas por sus hospederos, por consiguiente, el patógeno al infectar a una planta obtiene sus nutrientes neutraliza sus reacciones de defensa y causa efectos negativos sobre su fisiología. La enfermedad se presenta cuando la planta es dañada por la granizada, daño mecánico o helada; cuando se produce helada y cuando está herida no es cicatrizada inmediatamente se introducen estos microorganismos, con las condiciones favorables para su propagación que es la alta humedad (presencia de lluvias). Primero por la herida se introducen las bacterias, producen descomposición y en seguida se introducen los hongos.

III. MATERIALES Y MÉTODO

3.1 UBICACIÓN

3.1.1 Área de Estudio

De acuerdo al estudio de Suelos realizados por la ONERN y la CRYRZA, la zona en estudio se encuentra ubicada en el área o formación ecológica definida como bosque húmedo Montano Bajo Tropical (BH – MBT), la cual se extiende entre las cotas de 2,900 y 3,800 m.s.n.m., se caracteriza por presentar un clima templado a frío con dos estaciones diferenciadas: Una de Secano, desde Mayo hasta Agosto en ocasiones hasta Octubre y otro de Lluvias desde Septiembre hasta Abril, además presenta cambios bruscos de temperatura en los meses de Junio y Julio con heladas frecuentes, la Temperatura promedio mensual es de 14°C, la Precipitación media anual es de 792mm, la Evaporación promedio mensual es de 3.88 mm/día y la Velocidad del viento es moderada que varía desde 50 a 70 Km/día.

3.1.2 Descripción del Área Experimental

El presente trabajo de investigación fue conducido en la parcela experimental de la Facultad de Ciencias Agrarias – Escuela de Agronomía de la Universidad Nacional “Santiago Antúnez de Mayolo” (UNSAM), que se encuentra ubicada en:

a. Políticamente:

- Departamento : Ancash
- Provincia : Huaraz.
- Distrito : Independencia

b. Geográficamente

- Latitud : 9° 30' 59.5"
- Longitud : 77° 31' 29.5"
- Altitud : 3,079 m.s.n.m.

3.1.2.1 Análisis físico – químico del suelo

El análisis Físico-Químico del suelo se realizó tomando 03 muestras al azar del área experimental a una profundidad de 0 - 15 y 15 - 30 cm, luego se mezcló y homogenizó; para después obtener dos muestra de 1 kg cada muestra y realizar su respectivo análisis Físico-Químico del suelo; esta muestra se llevó y se analizó en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias agrarias- UNASAM y se muestran en el Cuadro N°02.

Cuadro 2: Análisis Físico-Químico del Suelo Experimental

PROFUNDIDAD (cm)	TEXTURA			CLASE TEXTURAL	Da (gr/ml)	Dr (gr/cm ³)	% HUMEDAD	
	Arena	Limo	Arcilla				C.C.	P.M.P
0 - 15	57	22	21	FRANCO ARCILLO ARENOSO	1.42		27	11
15 - 30	59	18	23	FRANCO ARCILLO ARENOSO	1.48		27	11

Fuente: Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias agrarias- UNASAM.

pH	M.O. %	Nt. %	p (ppm)	K (ppm)	Conductividad Eléctrica (dS/m)
6.56	2.613	0.121	15	112	0.462

Fuente: Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias agrarias- UNASAM.

El estudio de suelos, según el análisis Físico-Químico efectuado del área experimental presenta un horizonte cuya textura es moderadamente fina. El pH es ligeramente ácida. La conductibilidad eléctrica indica que no tiene problemas de salinidad. Es medianamente rica en materia orgánica, nitrógeno y medianamente rico en fósforo y potasio.

3.2 MATERIALES Y EQUIPOS

3.2.1 Equipos

3.2.1.1 Lisímetro

Para la ejecución del presente trabajo se contó con cuatro lisímetros de drenaje los cuales han sido confeccionados de cilindros metálicos, los mismos que fueron impermeabilizados con brea y luego pintados con pintura anticorrosiva (Anexo F).

Los accesorios de cada lisímetro empleado fueron:

- Tubería de $\varnothing = \frac{3}{4}$ " de PVC.
- Válvula de Agua $f = \frac{3}{4}$.
- Planchas Lac $e = 2.5\text{mm}$, 1.20×2.40 .
- Recipiente medidor del nivel de agua percolado.
- Niples de $f = \frac{3}{4}$ ", $L = 2.5$ ".
- Mallas metálicas galvanizadas
- Mallas finas de plástico.

a) construcción del lisímetro

Se consideró cuatro lisímetros. Los lisímetros fueron construidos de cilindros metálicos de 55 galones con dimensiones de:

- $H_{(\text{altura})} = 88 \text{ cm}$ y $D_{(\text{diámetro})} = 57 \text{ cm}$.

Generando un volumen total de 0.225m^3 ; se soldó en la parte inferior del cilindro a 20 cm sobre el fondo del mismo un soporte de fierro en forma de varillas con una separación de 2 cm cubriendo toda la base, sobre este se colocó mallas metálicas galvanizadas y mallas de plástico impermeabilizadas con anticorrosivo. Se conectó también una tubería de $\varnothing = \frac{3}{4}$ " de PVC y una válvula $\frac{3}{4}$ " para controlar el drenaje del lisímetro; en la base del cilindro se colocó planchas Lac de 3mm doblada con pendientes en tres direcciones dirigidas a la tubería de drenaje (Anexo F).

b) llenado del lisímetro

Para la recolección del suelo a ser utilizado se cavó una calicata con el fin de diferenciar los estratos. Una vez establecidos, se procedió a separarlos, uno a uno y en el mismo orden, en bolsas de plástico. Hecho esto, se colocó

encima de la malla un filtro de gravas gruesas luego finas haciendo un espesor de 10cm en total, seguido también de mallas de plástico y finalmente las capas de suelo en el orden en que se escavaron tratando de mantener, en lo posible, la misma disposición natural y densidad aparente que tenía el suelo en su estado original (Anexo F).

3.2.1.2 *Tensiómetro*

El tensiómetro utilizado fue de la marca IRROMETER Modelo LT (Low Tensión), que mide directamente la energía, es decir el esfuerzo que las raíces deben realizar extraer la humedad del suelo, consta de un tubo plástico cerrado herméticamente, en uno de sus extremos se encuentra una capsula porosa la que está en contacto con el suelo una vez instalado; en el otro extremo lleva un manómetro el cual registra la presión dentro del tubo la que se crea por la diferencia de humedades en el suelo el manómetro está graduado de 0 – 100, donde cada unidad representa una centésima de atmósfera. La unidad de medida es centibares (cb) (Anexo F).

3.2.1.3 *Pluviómetro*

Elaborado de planchas de hojalata de 3 m. para determinar la cantidad de lluvia precipitada en el área. Se siguió las consideraciones impartidas por el SENAMHI (Anexo F).

3.2.1.4 *Estación meteorológica*

La Estación Meteorológica Santiago Antúnez de Mayolo – tipo convencional SENAMHI, se encuentra ubicada dentro de la Ciudad Universitaria “Santiago Antúnez de Mayolo” (UNASAM), tiene la siguiente ubicación geográfica:

- **Paralelo, de Latitud Sur** : **9° 30' 59.5"**
- **Meridiano, de longitud Oeste** : **77° 31' 29.5"**
- **Altitud** : **3,079 m.s.n.m.**

La indicada estación esta implementada con los siguientes equipos: Termómetro de máximas y mínimas, Higrómetro y pluviómetro, tanque de evaporación tipo A. Dicha estación proporciona la siguiente información climática (Anexo F).

- **Temperaturas máximas, medias y mínimas mensuales.**
- **Humedad Relativas media mensuales (%).**
- **Horas de sol (horas y decimas de sol).**
- **Precipitación mensual.**

3.2.2 Materiales

3.2.2.1 *Cultivo de Quinua*

Se utilizó semilla comercial de quinua var Salcedo INIA, proveniente de campos de cultivo aledaños a la zona. En el Cuadro N° 03 se resumen sus características.

3.2.2.2 *Cultivo de Rye Grass*

Se utilizó semilla de Rye Grass Magnum.

3.2.2.3 *Variables climáticas*

Las observaciones meteorológicas registradas fueron obtenidas de la estación “Santiago Antúnez de Mayolo” SENAMHI – tipo convencional que se encuentra ubicada en las instalaciones de la ciudad universitaria. Se obtuvieron registros para un periodo histórico de 10 años (2007 – 2016) y para el periodo en estudio (mayo – octubre del 2016). Los factores climáticos que registra dicha estación se tomaron diariamente y lo solicité mensualmente. Estos parámetros fueron:

- Humedad relativa media mensual HRmed. (%)
- Horas de sol total (horas y decimas de sol).
- Precipitación total mensual pp (mm)
- Temperatura media mensual Tmed. (°C)

Estos registros se presentan en el (Cuadro N° 04 y Cuadro N°05).

Cuadro 3: Características del Cultivo

CARACTERISTICAS GENERALES	
Nombre de la Variedad	Salcedo INIA.
Lugar y Año de Liberación	Región Puno, 1995
Obtenedor y Mantenedor	Instituto Nacional de Investigación Agraria, EEA Illpa Puno (INIA).
Método de Mejoramiento	Cruza de las variedades Real Boliviana x Sajama en Puno. El proceso de selección del material segregante se realizó por el método masal genealógico en la EEA Illpa Puno, en 1983.
Adaptación	Altiplano en la zona agroecológica circunlacustre y suni del altiplano entre los 3800 y 3950 msnm, con clima semi seco frio, precipitación pluvial de 400 a 560 mm, con temperaturas de 6° a 17°C, en suelos de textura franco y franco arenoso con pH de 5,5 a 7,8. Valles interandinos y costa de 640 a 1314 msnm, temperatura máxima de 24 a 25°C en suelos de textura arenosa.
CARACTERISTICAS MORFOLÓGICAS	
Tipo de Crecimiento	Herbáceo
Porte de Crecimiento	Erecto
Altura de la Planta	1.40 a 1.60
Color de Axilas	No pigmentado
Presencia de Estrías	Ausentes
Color del Tallo	Verde Claro
Forma de la Panoja	Glomerulada
Longitud de la Panoja	Hasta 70 cm.
Densidad de Panoja	Intermedia
Color del Grano	Blanco
Tamaño del grano	Grande (1.8 a 2 mm de diámetro)
Sabor del Grano	Dulce es decir no requiere un lavado exigente.
CARACTERISTICAS AGRONÓMICAS	
Período Vegetativo	160 días. (Precoz).
Rendimiento Comercial	2.5 Tn. / ha.
Reacción a Factores Abióticos y Bióticos	Resistente al mildiu y es tolerante a heladas de hasta - 2°C

Fuente: INIA.

Cuadro 4: Datos climatológicos para un período de diez años (2007 – 2016). Estación meteorológica, tipo convencional “Santiago Antúnez de Mayolo”, Independencia, Huaraz Ancash

DATOS	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JUL.IO	AGOSTO	SEPT.	OCTUBRE	NOV.	DIC.
Humedad Relativa Media Mensual HRmed (%)	77.9	78.8	81.1	77.7	71.7	66.6	62.3	63.6	65.4	72.2	73.9	76.2
Horas de Sol Total (Horas y Décimas de Sol)	181.3	140.7	162.0	197.6	234.3	256.9	275.3	269.2	226.2	187.6	184.9	144.7
Horas de Insolación (n)	5.85	4.54	5.23	6.37	7.79	8.32	8.98	8.69	7.53	6.16	5.96	4.67
Precipitación Total Mensual pp (mm)	111.6	126.2	152.5	101.2	26.4	4.5	2.7	2.2	17.8	78.4	82.6	143.6
Temperatura Media Mensual Tmed. (°C)	14.6	14.2	14.0	14.5	14.3	13.9	13.6	14.2	14.9	14.5	14.4	13.9

Fuente SENAMHI.

Cuadro 5: Datos climatológicos para el período en estudio Mayo – Octubre 2016.
Estación meteorológica, tipo convencional “Santiago Antúnez de Mayolo”,
Independencia, Huaraz Ancash

PARÁMETROS	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE
Humedad Relativa Media Mensual (%)	64.6	58.8	54.3	52.3	65.6	72.2
Total Horas de Sol (horas y decimas de Sol)	264.2	253.5	290.5	271.7	220.5	187.6
Horas de Insolación (n) (hrs/día)	8.52	8.45	9.37	8.76	7.35	6.16
Precipitación Total Mensual (mm)	13.1	4.5	0.2	0.4	17.8	78.4
Temp. Media Mensual (°C)	15.2	14.1	13.9	14.8	14.9	14.5

Fuente SENAMHI.

Las observaciones meteorológicas registradas para la campaña agrícola 2016, nos muestra el comportamiento climático, en el desarrollo del cultivo de la quinua en dicha campaña, además de realizar una comparación con el promedio de 10 años.

Analizando los Cuadros N° 04 y 05 de datos climatológicos, se observa que las temperaturas medias registradas para el 2016 comparadas con el promedio de 10 años (2007-2016) son moderadamente superiores a las normales.

Del análisis se concluye, que las características climatológicas para la zona, son típicas de los denominados “Clima de Montaña” de las regiones Ecuatoriales, según la clasificación climatológica de Austin Miller, (1996).

3.3 METODOLOGÍA.

3.3.1 Instalación del Experimento

En un área de 9m² se preparó el terreno empleando pico y lampa donde se incorporó humus y compost. El análisis físico-químico del suelo se muestra en el Cuadro N°02.

Se instalaron cuatro Lisímetros para medir el balance hídrico, dichos equipos fueron ubicados simétricamente con áreas de influencia homogéneas.

En la instalación se tuvo en cuenta la posición de las capas de suelo tratando de que dentro de los lisímetros ocupen las mismas posiciones que los perfiles de suelos circundantes y la capa superior, manteniendo el mismo nivel con la finalidad de tener en cuenta el efecto de borde, el mismo que quedó a 5 cm. del nivel del terreno para evitar el ingreso del agua de riego del área adyacente. El suelo dentro del Lisímetro fue el mismo que el de su alrededor.

3.3.2 Calibración del Tensiómetro

Los Tensiómetros actúan como un maniquí de la raíz, lo que permite que la humedad del suelo interactúe con el instrumento a través de la punta de cerámica. Este es el método más exacto disponible y probado.

Las mediciones en los tensiómetros son fáciles de realizar pero su instalación requiere de una previa calibración, es por ello que se calibró el tensiómetro para determinar la curva de humedad p_f del suelo mediante el método de tensión del suelo, los pasos a seguir fueron los siguientes:

- Se realizó un riego de saturación y se instalaron dos tensiómetros a 15 cm y a 30 cm.
- Luego de 72 horas de que el suelo ha alcanzado su Capacidad de Campo se procedió a realizar la primera lectura del tensiómetro en centibares y se sacó una muestra del suelo para determinar su humedad por el método de la estufa por diferencia de pesos.
- A medida que el suelo se secaba, comenzaba a jalar agua de la columna de agua del tensiómetro a través del bulbo de cerámica, provocando una fuerza de succión en la columna de agua. Esta fuerza se midió con un indicador de succión (manómetro) en centibares para este caso y se anotó.

- Se tomó lectura y se sacó muestras del suelo para determinar su % de humedad dos veces por semana por un espacio de dos meses (setiembre a noviembre del 2015).
- Obtenidos los datos se graficó en un sistema de eje cartesiano los pares de valores de tensión y contenido de humedad del suelo obtenidos. Así se determinó la relación directa entre ambos parámetros, de manera que conociendo el valor de uno de ellos podemos conocer el otro.
- Los gráficos se muestran en el Anexo E.

3.3.3 Instalación del Tensiómetro

Con la finalidad de medir la tensión del agua y a partir de ella establecer los riegos diarios, se colocaron los tensiómetros a 15 y 30 cm de profundidad.

Para la instalación del tensiómetro se hará un agujero en el suelo a la profundidad deseada y de diámetro coincidente con el mismo.

El tensiómetro se entierra en el suelo y es necesario llenarlo de agua eliminando cualquier burbuja de aire, antes de cerrarlo herméticamente. En estas condiciones, el agua que llena la columna de agua está a la presión atmosférica y el manómetro marca cero.

3.3.4 Conducción de los Cultivos en el Experimento

3.3.4.1 Cultivo de Quinua

✓ Preparación del Terreno.

Se realizó el preparado del terreno dentro y fuera de los lisímetros 15 días antes de realizar la siembra con la finalidad de que las condiciones físicas dentro del lisímetro sean comparables con los de afuera. Se utilizó un pico para remover la tierra y hacer los surcos y un rastrillo para eliminar terrones y lograr una buena nivelación, las rastra se realizaron en forma cruzada.

✓ Siembra.

Luego de preparar el terreno se puso el suelo en condiciones de capacidad de campo dentro y fuera de los lisímetros y luego realizar el primer riego controlado.

Se destinó 03 lisímetros para la siembra de quinua.

La siembra se realizó el 01 de Mayo del 2016, con una sembradora fabricado manualmente (lata con agujeros en su base) con una densidad de siembra de 15 kg/ha.

- A chorro continuo con un distanciamiento de 40 cm entre surco para la zona adyacente y con una profundidad aproximadamente de 2 cm.
- Al voleo para los 03 lisímetros, luego fueron cubiertos con la misma tierra.

Al momento del tapado se verificó que las semillas quedaran a una profundidad no mayor de 2cm.

Se incorporó humus y compost al momento de la siembra.

La fertilización se realizó de acuerdo a los resultados del análisis de fertilidad que se obtuvo en el laboratorio.

Antes a la siembra se desinfectó las semillas con los siguientes fungicidas (Benomil + Vitavax).

✓ **Labores Culturales.**

Una vez instalado y sembrado el cultivo de la quinua, se realizó el desahije a los 25 a 30 días después de la emergencia y dejando aproximadamente 10 plantas por metro lineal. Se deshiero de forma manual, en forma simultánea con el desahijé, aprovechando la humedad del suelo los días después de riego. Esta labor se realizó después del deshiero o control de maleza y cuando en la mayoría de plantas se empezaba a observar el panojamiento.

✓ **Ataque de aves**

Las aves ocasionaron daños durante los últimos períodos vegetativos de la planta, especialmente en el estado lechoso, pastoso y de madurez fisiológica del grano.

Cuando picotean la panoja, producen la caída de un gran número de semillas por desgrane o ruptura de los pedicelos de los glomérulos. En la costa, las aves pueden destruir por completo el cultivo en el momento de la emergencia de los cotiledones. El ataque es más notorio en las variedades dulces, Según Delgado (2014), citado por Porras (2015), a través del proyecto “Aves plaga del cultivo de la quinua y alternativas de control”, determinó que durante la campaña agrícola 2012-2013, los daños promedio

ocasionados por aves plaga en el cultivo de la quinua bajo condiciones de costa (Arequipa) fue del orden de 11% de producción.

✓ **Cosecha.**

Se realizó el 10 de noviembre cuando transcurrieron 190 días, la actividad se realizó en forma manual cortando con la ayuda de una hoz.

3.3.4.2 *Cultivo de Rye Grass*

Se destinó un lisímetro para la siembra del cultivo de *rye grass magnum*.

Luego de preparar el terreno y ponerlo a capacidad de campo.

La siembra se realizó al voleo el 18 de marzo del 2016. Con una densidad de siembra de 15 kg/ha.

Se mantuvo a una altura constante de 10 a 15 cm. el cual se recortaba quincenalmente para así mantener su altura uniforme.

El cultivo del Rye grass no presentó problemas de enfermedades ni plagas,

3.3.5 **Aplicación de Riegos**

Se programó y aplicó riegos a intervalos fijos, con el objetivo de minimizar la variación de humedad y así despreciarlo cuando se haga el balance hídrico. Para ello se debe regar el suelo cada vez que la lectura del tensiómetro marque el descenso tolerable de humedad del suelo ($n = 0.30$ para quinua) del valor entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente del suelo. Para mantener el suelo a capacidad de campo, se controló con el tensiómetro instalado para tal fin, que para este caso se regó cada vez que éste marcó una tensión de 22 centibares que fue de aproximadamente tres días, lo que hizo que se regara dos veces por semana según indicaba el tensiómetro.

3.3.5.1 *Riego inicial*

La lámina aplicada (La) fue determinada mediante la ecuación (ver Ec. 14 y 15).

$$La = \left(\frac{CC - PMP}{100} \right) * Da * Pr$$

Donde:

- CC : Capacidad de Campo
 PMP : Punto de Marchitez Permanente.
 Da : Densidad Aparente.
 Pr : Profundidad radicular.

El volumen aplicado (Va) se calculó con la siguiente expresión:

$$V_a = \text{Área} * L_a \quad (16)$$

Donde:

- Área : Área del lisímetro
 La : Lámina aplicada.

3.3.5.2 Frecuencia de riego

Se estableció una frecuencia de riego de tres días para el rye grass con una lámina de 9.796 mm durante los dos primeros meses, luego con una lámina de 31.348 mm para los cuatro meses restantes.

Para el caso del cultivo de la Quinoa la frecuencia de riego obedeció al tensiómetro, con una lámina inicial de 5.878 mm durante los dos primeros meses, lo cual fue variando conforme incrementaba su biomasa. Las mismas que representaron la lámina consumida entre un riego y otro.

Antes de aplicar la lámina se realizaba la lectura correspondiente y se procedía a drenar y recoger el exceso de agua en un recipiente de volumen conocido.

3.3.6 Balance Hídrico en el Lisímetro

En cada Lisímetro la cantidad de agua ingresada por riego (R), por precipitación (P), además la cantidad de agua excedente por percolación (D), escurrimiento superficial y la variación de la humedad (ΔH) permitió establecer la siguiente expresión: (Ver Ec. 05)

$$ET = P + R - ES - D + C \pm \Delta SW$$

Donde, **ET** es la evapotranspiración del cultivo (ET) desde el último riego hasta el presente.

La cantidad de agua excedente (D) por percolación se determinó recojiéndolo en un recipiente de volumen conocido, correspondiente al último y primer día del período considerado.

La humedad del suelo en los lisímetros se mantuvo a un nivel óptimo alrededor de la humedad a capacidad de campo, los mismos que fueron controlados mediante un tensiómetro, el escurrimiento superficial no se considera en los lisímetros. Bajo estas consideraciones la ecuación anterior se convierte en:

$$ET = (R+P) - D \quad (17)$$

Donde:

- ET** : Evapotranspiración del cultivo mm/día.
- R** : Riego mm.
- P** : precipitación para el período mm.
- D** : Lámina percolada en mm.

3.3.7 Determinación de la Evapotranspiración del Cultivo de Referencia – ETo (Rye grass).

3.3.7.1 Determinación por el método del lisímetro

Para el siguiente trabajo de investigación se utilizaron lisímetros de drenaje.

- ✓ El cultivo de referencia que se usó fue el rye grass magnum, el cual se instaló bajo condiciones reales de desarrollo.
- ✓ La evapotranspiración de referencia (ETo) fue determinada en base a períodos cada 3 o 4 días de acuerdo a la frecuencia de riego, a partir de la ecuación que expresa el balance hídrico (Ec. 19) a cualquier momento.
- ✓ Se realizó el balance hídrico, es decir en vista que se regó el cultivo de rye grass cuando estuvo a la misma humedad solo fue necesario saber la cantidad de agua aportada por riego y por lluvia y la cantidad del agua drenada para determinar la ETo.

$$ETo = (R+P) - D$$

- ✓ La ETo se consolidará mensualmente en mm/mes.

La evapotranspiración obtenida experimentalmente mediante el método lisimétrico se registró mensualmente en el Cuadro N° 06.

En el Anexo A Cuadro A-1, se presentan los datos diarios. La precipitación es acumulativa para el período entre intervalos de riego.

3.3.7.2 *Estimación con métodos indirectos*

Una vez obtenidos los registros promedios mensuales de los factores climáticos se estimó la evapotranspiración potencial trabajando en gabinete usando el programa Microsoft Office Excel 2007, al igual que las gráficas las siguientes fórmulas:

- Blaney–Criddle.
- Radiación.
- Hargreaves
 - En base a la Radiación
 - En base a la Temperatura.
- Turc
- Jensen y Haise
- Thornthwaite.

Para evaluar la ETP por cada método durante el período vegetativo del cultivo de la quinua, se calculará la ETP por cada mes en mm/mes.

Las cuales fueron tratadas en la revisión bibliográfica), y se presenta en el Cuadro N° 04, un ejemplo del procedimiento se presenta en el Anexo D.

3.3.8 **Cálculos Estadísticos Efectuados**

Con los datos obtenidos se efectuaron los siguientes cálculos y análisis:

- Se calculó el error absoluto en base a los datos de evapotranspiración de referencia lisimétrica (ET_0) y la evapotranspiración potencial calculada (ETP) por las diferentes ecuaciones en promedio mensual; con la finalidad de ver el grado de sub-estimación y sobre-estimación con respecto a la ET_0 lisimétrica. (Cuadro N° 14).
- El error absoluto de una cantidad es igual al valor absoluto de la diferencia entre la cantidad absoluta y su aproximación incluye sus unidades físicas.

- Haremos uso de la fórmula establecida de error absoluto para este caso, que se relaciona de la siguiente manera en la ecuación 18

$$\text{ERROR ABSOLUTO} = |ETo Lisímetro - ETP Ecuaciones| \quad (18)$$

- **El error relativo** es el cociente (la división) entre el error absoluto y el valor exacto. Si se multiplica por 100 se obtiene el tanto por ciento (%) de error y no tiene unidades.
- Por lo tanto para fines del proyecto se expresa como se muestra en la ecuación 19.

$$\text{ERROR RELATIVO (\%)} = \frac{ETo Lisímetro - ETP Ecuaciones}{ETo Lisímetro} \quad (19)$$

- Se calculó también la desviación estándar de los errores obtenidos para cada una de las 07 ecuaciones trabajadas y así medir su variabilidad, como se muestra en la ecuación 20.

$$s = \sqrt{\frac{\sum XI^2 - (\sum XI)^2/n}{(n - 1)}} \quad (20)$$

3.3.8.1 fórmula adecuada

Con el desarrollo de las fórmulas anterior mencionada, se hará una comparación con la evapotranspiración de referencia obtenida con el lisímetro (rye grass). para recomendar aquella que más se ajusta a esta que se obtuvo experimentalmente. Es decir aquella que presenta el menor valor de error relativo.

3.3.9 Determinación de la Evapotranspiración del Cultivo de Quinua (ETR) Por El Método del Lisímetro

Para el siguiente trabajo de investigación se utilizaron lisímetros de drenaje para determinar estos requerimientos durante el periodo vegetativo del cultivo de quinua.

- ✓ El cultivo de quinua se instaló bajo condiciones reales de desarrollo y donde se reprodujo el balance hídrico (Ec. 19) de la relación agua – suelo – planta, para medir de manera directa la evapotranspiración del cultivo.

$$ET_o = (R+P) - D$$

- ✓ Por el método del lisímetro se midió en forma directa y exacta la cantidad de agua evapotranspirada por el cultivo de quinua durante su período vegetativo.
- ✓ Para obtener el agua consumida se realizó la diferencia de las lecturas diarias entre un riego y otro, esta agua evaporada y transpirada será el agua evapotranspirada de la planta y del suelo en el lisímetro.

De esta manera se calculó la evapotranspiración del cultivo de quinua obtenida mediante el método lisimétrico y se registra en el Anexo B Cuadro B-1, B-2 Y B-3 por períodos. La precipitación es acumulativa para el período entre intervalos de riego.

3.3.10 Estimación del Coeficiente de Cultivo (Kc)

Para determinar el Kc del cultivo en estudio, se realizó evaluaciones, según recomendaciones dadas por la FAO, enunciadas en la revisión bibliográfica. Se consideró los siguientes pasos:

1. Fecha de siembra.
2. Se estableció el período vegetativo en días para cada estado de crecimiento del cultivo de la quinua, según observaciones realizadas en el campo experimental.
3. De acuerdo a **Salazar (1972) y Vásquez (1992)**, se utilizó la relación (Ver Ec. 04), para lo cual la ETR de la quinua se registró todos los días (drenaje) al igual que para la ETo (rye grass).

$$Kc = \frac{ETR}{ETP}$$

Según Vásquez et al., (1992), el principio en que se basa consiste en considerar que si dentro de un mismo ambiente se mide simultáneamente la ETo como la del cultivo ETR, durante un determinado período de tiempo, entonces existirá una relación entre ambos valores de la evapotranspiración cuya cuantificación estará dada por un factor de proporcionalidad al que se le denomina coeficiente de cultivo.

Cuadro 6: Etapas Fenológicas del Cultivo de Quinua (*Chenopodium quinoa willd*), Variedad Salcedo INIA.

FASES FENOLÓGICAS	ETAPAS	N° DIAS OBSERVADOS	N° DE DÍAS CONSIDERADOS
Comprendió desde: - La siembra. - La emergencia - Cuatro hojas verdaderas que el cultivo este el 50% +1 establecido en el campo.	Etapa Inicial	0 – (27 – 30)	30
Comprendió desde: - Seis hojas verdaderas, - La ramificación. - Hasta Inicio de panojamiento, que el cultivo este el 50% +1 de las plantas.	Etapa de desarrollo	30 – (90 – 95)	60
Comprendió desde: - El panojamiento. - Inicio de floración. - Hasta la floración.	Etapa de mediados de Temporada	90 – (150 – 155)	60
Comprendió desde: - Grano lechoso - Grano pastoso. - Madurez fisiológica.	Etapa final	150 – (180 – 190)	30

Fuente: INIA.

3.3.11 Curvas del Coeficiente de Cultivo (Kc)

Las curvas del coeficiente de cultivo se graficaron teniendo en cuenta los siguientes pasos:

1. Se determinó el número de días de las etapas del período vegetativo (Ver Cuadro N°06). El período vegetativo de la quinua var. Salcedo INIA. Fue de 6 meses que hacen 180 días pero en nuestro caso se observó que llegó hasta unos 190 días
2. Determinación del Kc inicial. La siembra se dio en 01 de mayo y la fase inicial del cultivo duró de 27 a 30 días en campo, y se consideró 30 días.
3. Determinación del Kc de desarrollo. La fase de desarrollo, duró de 30 a 95 días en campo y se consideró 60 días.
4. Determinación del Kc de mediados de temporada. La fase de mediados de temporada, duró de 96 a 155 días en campo y se consideró 60 días.
5. Determinación del Kc final. La fase final duró de 156 a 190 días en campo y se consideró 60 días.
6. Se hace la relación entre ambos valores, el de la evapotranspiración de referencia (ET_o) con la evapotranspiración del cultivo (ETR), como se muestra en la Ec.
7. Luego se lleva a un eje cartesiano, los pares de valores del Kc obtenido y el número de días de cada periodo.
8. Finalmente se trazan las curvas.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados y sus interpretaciones del presente estudio, se muestran en el siguiente capítulo, para su análisis y discusión.

4.1 DESARROLLO DE LOS CULTIVOS.

4.1.1 Cultivo de Quinoa

En el cultivo de quinoa se observó que en todos los lisímetros el desarrollo de las plantas fueron similares al resto de la parcela experimental sin presentar diferencias significativas hasta su desarrollo durante los tres primeros meses, posteriormente se vio afectado durante el mes de julio y agosto por las bajas temperaturas.

También se tuvo ataque de aves, las aves ocasionaron daños durante los últimos períodos vegetativos de la planta, especialmente en el estado lechoso, pastoso y de madurez fisiológica del grano.

Cuando picotearon la panoja, produjeron la caída de un gran número de semillas por desgrane o ruptura de los pedicelos de los glomérulos y como consecuencia ocasionaron desestabilidad a la planta de quinoa. Pero siempre se dio asistencia al cultivo durante todo su período.

4.1.2 Cultivo de Rye Gras

Por otro lado el rye grass se desarrolló muy bien y no presentó ningún problema fitosanitario en todo el tiempo que duró el experimento, se mantuvo siempre a humedad constante y recortándolo quincenalmente para mantener una altura uniforme de 10 a 15 cm.

4.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA ESTIMADA CON LISÍMETRO.

La evapotranspiración de referencia (ET_o) se determinó experimentalmente con el cultivo de Rye grass mediante el método del lisímetro.

Los resultados se calcularon mensualmente en milímetros (mm/día) y se muestran en el Cuadro N° 07 y la figura 06, donde se observa que la ET_o varía de 3.7 a 8.9 mm/día. Se observa también que desde el mes de mayo a agosto va en aumento bajando en setiembre y aumentando nuevamente en octubre.

CUADRO 7 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET_o) CON LISÍMETROS.

MES	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SETIEMBRE	OCTUBRE
ET _o mm/día	3.7	4.9	6.9	6.1	5.9	8.9

Fuente: Elaboración Propia.

4.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL ESTIMADA CON FÓRMULAS EMPÍRICAS.

Se emplearon 07 métodos indirectos o empíricos y los resultados se observan en el Cuadro 08 y 09 y en las figura 5 y 6.

Para evaluar la ETP por cada método durante el período vegetativo del cultivo de la quinua, se optó por calcular la ETP para cada mes en mm/mes.

4.3.1 Para el Período de 10 Años (2007 – 2016)

Se muestra en el Cuadro N°08, resultando ser el de mayor valor para la ecuación de Turc con 5.83 mm/día. Thornthwaite con 5.75 mm/día, Hargreaves radiación con 4.78 mm/día, Hargreaves Temperatura con 4.77 mm/día. Radiación con 4.14 mm/día y Jensen – Haise con 3.34 mm/día y Blaney – Criddle con 2.13 mm/día.

4.3.2 Para el Período de Estudio (Mayo 2016 – Octubre 2016)

Se muestran en el Cuadro N° 09, resultando ser el de mayor valor para la ecuación de Thornthwaite con 5.80 mm/día, Hargreaves Temperatura con 5.67 mm/día,

Turc con 5.45 mm/día, Hargreaves radiación con 5.03 mm/día, Radiación con 4.45 mm/día, Jensen – Haise con 3.55 mm/día y Blaney – Criddle con 2.13 mm/día.

- ✓ Se puede deducir que los valores de ETP para el período de diez años no son similares y tampoco el período de la campaña agrícola de quinua en la que se ejecutó el experimento para la zona.
- ✓ Observamos también que el orden descendente de las ecuaciones para ambos períodos son diferentes, pero siguen siendo la ecuación de Blaney – Criddle la más baja.
- ✓ En el Cuadro N°09 se observa los datos climatológicos para el período en estudio los que se usaron para estimar las 07 ecuaciones usadas para el cálculo de la ETP para el período en estudio.
- ✓ Para tener una apreciación más clara, estos valores así obtenidos han sido llevados a una gráfica, la cual apreciamos en la Figura 5 y conjuntamente con los valores de Evapotranspiración del cultivo de referencia rye grass (ET_o) en la Figura 6. Analizando la fig. 06, se observa que la ecuación de Blaney tiende y la ecuación de Jensen Haise tiende a sub estimar estos valores, dando valores por debajo de los valores lisimétricos. Estas variaciones entre una y otra ecuación son originadas por las variables que utilizan cada uno de las ecuaciones, en los cálculos correspondientes.

CUADRO 8 Resultado de la Evapotranspiración Potencial Calculada Empleando Fórmulas (mm/día) para un Período de Diez Años (2007 – 2016)

FÓRMULAS	ENE.	FEB.	MAR.	ABRIL	MAY.	JUNIO	JULIO	AGOST.	SEPT.	OCT.	NOV.	DIC.	PROMEDIO
BLANEY – CRIDDLE ETP B	2.17	2.00	1.97	1.9	2.22	2.17	2.14	2.35	2.44	2.03	2.02	2.09	2.13
JENSEN – HAISE ETP JH	3.51	3.08	3.11	3.27	3.28	3.14	3.33	3.62	3.77	3.53	3.47	3.01	3.34
RADIACION ETP R.	4.17	3.69	3.78	3.87	3.94	4.14	4.49	4.77	4.77	4.20	4.16	3.67	4.14
HARGREAVES TEMPERATURA ETP HT.	4.26	4.42	3.89	4.27	4.79	5.33	5.44	5.41	5.53	4.77	4.76	4.35	4.77
HARGREAVES RADIACIÓN ETP HR.	4.97	4.41	4.48	4.64	4.69	4.55	4.87	5.20	5.28	5.00	4.94	4.35	4.78
THORNTHWAITE ETP THO	6.27	5.57	5.68	5.84	5.63	5.17	5.26	5.64	5.94	6.09	5.96	5.93	5.75
TURC ETP T.	6.45	6.77	5.99	5.62	5.06	4.84	4.79	5.29	6.11	6.26	6.55	6.22	5.83

Fuente: Elaboración Propia.

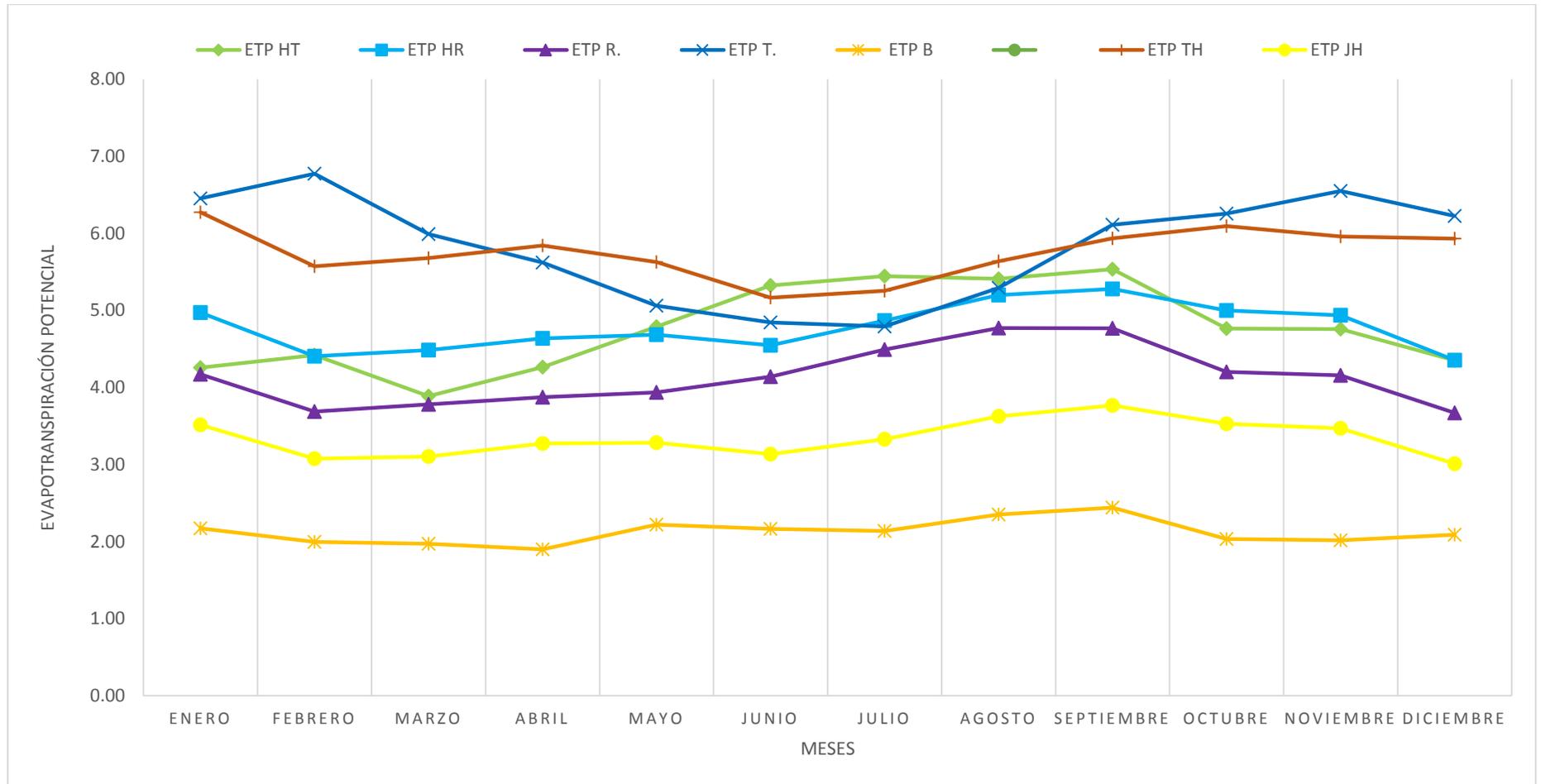


Figura 5 Gráfica comparativa de la Evapotranspiración calculada con fórmulas (mm/día) para un promedio de 10 Años (2007 – 2016)

CUADRO 9 Datos Climatológicos, Evapotranspiración calculada (Fórmula) y medida (Lisímetro) para el período en estudio (Mayo 2016 – Octubre 2016)

DATOS	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST.	SEPT.	OCT.
HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL (%)	71.7	66.6	62.3	63.6	65.4	72.2
TOTAL HORAS DE SOL (HORAS Y DECIMAS DE SOL)	234.3	256.9	275.3	269.2	226.2	187.6
HORAS DE INSOLACIÓN (Hrs./día) (n)	7.79	8.32	8.98	8.69	7.53	6.16
DURACIÓN HORAS INSOLACIÓN (N)	11.60	11.50	11.60	11.80	12.00	12.30
PRECIPITACION TOTAL MENSUAL (mm)	13.1	4.5	0.2	0.4	17.8	78.4
TEMP. MEDIA MENSUAL (°C)	15.2	14.1	13.9	14.8	14.9	14.5
TEMPERATURA (°F)	84.89	82.91	82.53	84.26	84.49	83.77
MF	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90
CH	0.99	1.07	1.12	1.15	0.98	0.87
CE	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06
RADIACIÓN EXTRATERRESTRE Ra (mm/día)	12.80	12.00	12.40	13.50	14.80	15.90
RADIACIÓN SOLAR Rs (mm/día)	7.90	7.41	8.11	8.39	8.23	7.96
FACTOR DE PONDERACIÓN (W)	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69
FÓRMULAS						
ETP HT – HARGREAVES TEMPERTURA	5.45	5.93	6.02	6.28	5.54	4.77
ETP HR – HARGREAVES RADIACIÓN	5.03	4.61	5.02	5.30	5.22	5.00
ETP R –R ADIACIÓN	4.17	4.18	4.62	4.80	4.70	4.20
ETP T – TURC	5.21	4.88	4.83	5.41	6.12	6.26
ETP B – BLANEY - CRIDDLE	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32
ETL – LISÍMETRO	3.68	4.94	6.88	6.13	5.94	8.88
ETP – JENSEN - HAISE	3.63	3.20	3.46	3.78	3.73	3.53
ETP THO – THORNTWHAITE	6.09	5.26	5.37	6.00	5.98	6.09

Fuente: Elaboración Propia.

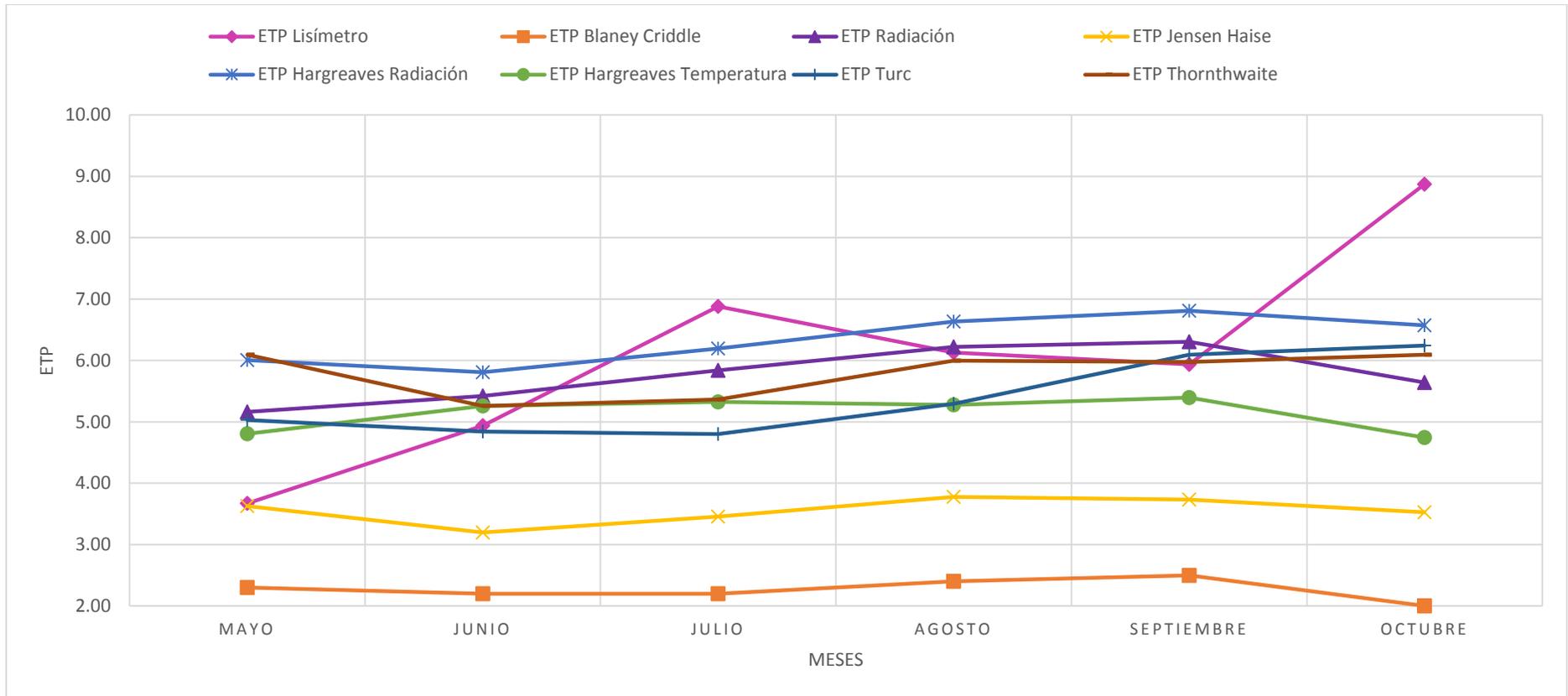


Figura 6 Gráfica comparativa de ETo (Lisimétrica) y ETP (Ecuaciones) para el período en estudio

CUADRO 10 Resultado de la Evapotranspiración calculada (ETP) y la Evapotranspiración lisimétrica (ETo) en mm/ día con sus respectivos promedios para el período en estudio (Mayo 2016 – Octubre Del 2016)

MESES	ETPL (rye grass) mm/día	ETP THO. mm/día	ETP HT. mm/día	ETP T. mm/día	ETP HR. mm/día	ETP R. mm/día	ETP JH. mm/día	ETP B mm/día
MAYO	3.7	6.1	5.5	5.2	5.0	4.2	3.6	2.3
JUNIO	4.9	5.3	5.9	4.9	4.6	4.2	3.2	2.2
JULIO	6.9	5.4	6.0	4.8	5.0	4.6	3.5	2.2
AGOSTO	6.1	6.0	6.3	5.4	5.3	4.8	3.8	2.4
SETIEMBRE	5.9	6.0	5.5	6.1	5.2	4.7	3.7	2.5
OCTUBRE	8.9	6.1	4.8	6.3	5.0	4.2	3.5	2.0
X_i	36.4	34.8	34	32.7	30.2	26.7	21.3	13.6
\bar{X}	6.1	5.8	5.7	5.5	5.0	4.5	3.6	2.3

Fuente: Elaboración Propia.

4.4 DEFINICIÓN DE LA FÓRMULA EMPÍRICA ADECUADA PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL.

Como se mencionó en la metodología, en el ítem 3.3.8 y 3.3.8.1, se presenta el Cuadro N° 11 con los resultados obtenidos.

Realizando los cálculos de la prueba del error absoluto y relativo para las diferentes ecuaciones en comparación con el lisímetro y haciendo uso de la fórmula establecida en la Ec. 18 y 19, se observa en el Cuadro N° 11 que las ecuaciones de Blaney Criddle y Jensen Haise presentan en promedio los valores más altos con 59.5 y 37.0 respectivamente, mientras que Turc y Thornthwaite presentan en promedio los valores más bajos del grupo con 19.6 y 21.4 respectivamente, dejando a Hargreaves con Temperatura, Hargreaves con Radiación y Radiación con valores intermedios de 22.7, 23.3 y 26.1 respectivamente. Esto permite saber la precisión de la medida realizada, y la precisión es muy conveniente saberla.

Las desviaciones estándar mide la variabilidad de los datos de una población o muestra, se observa también que las ecuaciones de Hargreaves con Temperatura y Thornthwaite tienen las desviaciones estándar más altas de 20.0 y 24.9, las ecuaciones de Blaney Criddle, Radiación y Hargreaves con Radiación tiene las desviaciones más bajas con 13.4, 14.6 y 14.9, y dejamos al grupo de las ecuaciones de Turc y Jensen Haise, con las desviaciones intermedias de 16.4, 19.9 respectivamente.

La desviación estándar es la medida de dispersión más común, que indica qué tan dispersos están los datos con respecto a la media de su grupo internamente. Cuanto mayor sea la desviación estándar, mayor será la dispersión de los datos.

Para nuestro caso diremos que las ecuaciones de Turc y Thornthwaite son las que presentan menor error relativo en promedio y en comparación con todo el grupo de las siete ecuaciones, así mismo la ecuación de Thornthwaite presenta alta variabilidad.

Observamos que la ecuación de Blaney Criddle y Jensen Haise tiende a subestimar en comparación de las demás ecuaciones que sobrestiman ligeramente.

Por lo tanto las ecuaciones que mejor se ajustan a la evapotranspiración de referencia obtenidos por el método del lisímetro para la zona; son las ecuaciones de Hargreaves con Temperatura (22.7%), Thornthwaite (21.4%) y Turc (19.6%), ya que son las que más y mejor se ajustan a la curva de la evapotranspiración de referencia obtenida experimentalmente y son las que menor error relativo presentan.

CUADRO 11 Porcentaje de error de la Evapotranspiración Potencial Calculada (ETP) con las fórmulas respecto a la Evapotranspiración de referencia lisimétrica (ETo)

MESES	ETPL (rye grass) mm/día	ETP Blaney mm/día	ERROR RELATIVO %	ETP Radiación mm/día	ERROR RELATIVO %	ETP Hargr. Radiación mm/día	ERROR RELATIVO %	ETP Hargr. Temp. mm/día	ERROR RELATIVO %	ETP Turc mm/día	ERROR RELATIVO %	ETP Jensen Haise mm/día	ERROR RELATIVO %	ETP Thornthwaite mm/día	ERROR RELATIVO %
MAYO	3.7	2.3	37.4	4.17	13.4	5.03	36.9	5.45	48.4	5.21	41.7	3.63	1.3	6.09	65.8
JUNIO	4.9	2.2	55.5	4.18	15.4	4.61	6.8	5.93	20.0	4.88	1.4	3.20	35.3	5.26	6.3
JULIO	6.9	2.2	68.0	4.62	32.8	5.02	27.1	6.02	12.5	4.83	29.8	3.46	49.8	5.37	22.0
AGOSTO	6.1	2.4	60.9	4.80	21.7	5.30	13.6	6.28	2.5	5.41	11.8	3.78	38.4	6.00	2.2
SEPTIEMBRE	5.9	2.5	57.9	4.70	20.8	5.22	12.1	5.54	6.6	6.12	3.2	3.73	37.1	5.98	0.7
OCTUBRE	8.9	2.0	77.5	4.20	52.7	5.00	43.7	4.77	46.3	6.26	29.5	3.53	60.2	6.09	31.3
Promedio	6.1	2.3	59.5	4.4	26.1	5.0	23.3	5.7	22.7	5.5	19.6	3.6	37.0	5.8	21.4
Desviación Estándar			13.4		14.6		14.9		20.0		16.4		19.9		24.9

Fuente: Elaboración Propia.

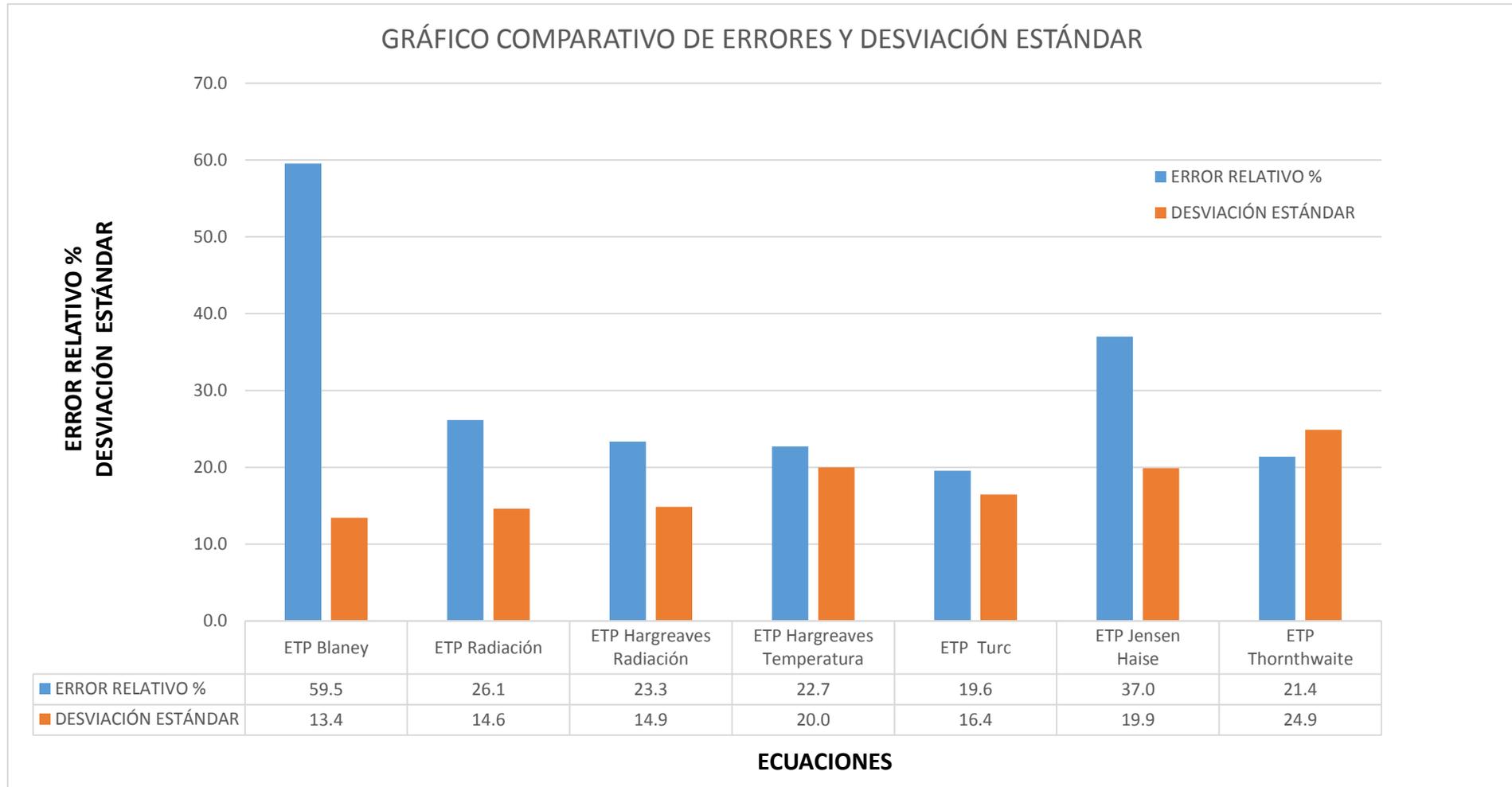


FIGURA 7 Gráfica Comparativa de Errores y Desviación Estándar.

Fuente: Elaboración Propia.

4.5 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE LA QUINUA.

Los resultados se muestran en el Cuadro N°11.

CUADRO 12 Registro mensual de la Evapotranspiración del cultivo de Quinua (ETR)

MES	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SETIEMBRE	OCTUBRE	SUMATORIA
ETR mm/día	1.8	1.7	6.2	5.7	8.4	6.2	30.0
ETR mm	56.2	52.9	187.5	182.1	247.7	174.0	900.4

Fuente: Elaboración Propia.

En el Cuadro N° 12 se presentan los datos consolidados mensualmente de la evapotranspiración del cultivo de quinua por el método lisimétrico para su período vegetativo, a través del registro diario de consumo de lámina de agua dentro del lisímetro mostrando con claridad los meses máximos y mínimos, variación que se da debido a los cambios meteorológicos en la campaña agrícola 2016 y el estado de desarrollo del cultivo durante su período vegetativo de 190 días. En el cual la variación de la evapotranspiración del cultivo de quinua (ETR) va desde 1.8 mm hasta 8.4 mm, la cual está en función directa del estado de desarrollo de las plantas, bajo las condiciones reales de explotación las cuales involucran las pérdidas de agua tanto por evaporación del suelo y transpiración del cultivo.

Como se muestra la evapotranspiración del cultivo de quinua determinado por el método lisimétrico fue de 900.4 mm de lámina de agua (9004.0 m³/ha)

Cabe recalcar, que los resultados obtenidos de ETR del cultivo de quinua en el sistema lisimétrico para las condiciones de la zona pueden considerarse confiables porque integran “in-situ” las condiciones locales reales de los factores influyentes en la ETR motivo de estudio, por decir es el caso de la temperatura media, factor que indica mayor evapotranspiración del cultivo de quinua.

Se resalta, que los resultados del cuadro 12, se contrasta con lo indicado por Santa Olalla y Juan Valero (1993), “la transpiración aumenta a medida que crece la planta y se desarrolla la cubierta vegetal, de tal manera de que cuando la cubierta es total,

la transpiración es la fuente principal de la pérdida de agua, pudiendo estar entre los 90 a 95% de la evapotranspiración (ET)".

En el Anexo B Cuadro B-1, Cuadro B-2 Y Cuadro B-3 se presentan los datos diarios. La precipitación es acumulativa para el período entre intervalos de riego.

4.6 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CULTIVO (Kc) DE LA QUINUA.

De acuerdo a la metodología señalada en el ítem 3.3.10, se registran en el Cuadro N° 13 los resultados del coeficiente de cultivo de la quinua (Kc) y se grafica en las figuras 7 y 8.

CUADRO 13 Registro del coeficiente de cultivo del cultivo de Quinua (Kc) por estado fenológico

Cultivo Quinua (Var. Salcedo INIA)	ETAPADAS DE CRECIMIENTO	INICIAL	DESARROLLO	MEDIADOS	FINAL
	DURACIÓN EN DIAS	30	60	60	30
	ETR mm	56.2	240.4	429.8	174.0
	ETR mm/día	1.8	4.0	7.0	6.2
	ETo mm/día	3.4	5.9	6.0	8.9
	Kc	0.5	0.7	1.2	0.7

Fuente: Elaboración Propia.

En efecto la ETo y la ETR fueron determinados por lisímetros y se muestra en el Cuadro N° 12 los resultados consolidados para el período en estudio y la adecuación al período vegetativo propuestas por la FAO (Doorembos y Pruitt 1982).

Del cuadro observamos que la ETR de la quinua fue de 429.8 mm de lámina de agua y ocurrió en la etapa de mediados de temporada que corresponde a las fases fenológicas de panojamiento y floración y se dieron en los meses de agosto y

setiembre, que es cuando las plantas alcanzaron su mayor crecimiento de altura, desarrollándose aquí una mayor actividad fisiológica.

En tanto los valores máximos alcanzados de K_c fue en la etapa de mediados de temporada $K_c = 1.2$ y etapa de desarrollo $K_c = 0.7$ los cuales ocurrieron en los meses de agosto, setiembre, junio y julio en donde las temperaturas medias registradas fueron de 14.8°C y 14.9°C , 14.1°C , 13.9°C , respectivamente.

Al respecto, trabajos realizados en el Altiplano, de coeficiente de cultivo para quinua (K_c) presentan K_c máximos de 1.20 (desarrollo y fructificación), $K_c = 1.14$ (grano lechoso), $K_c = 1.00$ (desarrollo y mediados de temporada), $K_c = 1.11$ (etapa de desarrollo). De estos coeficientes obtenidos también por el método lisimétrico para las condiciones del Altiplano decimos que el K_c determinado para nuestra zona oscila cercanamente a estos valores, coincidiendo también con la mayoría en la etapa de floración y fructificación.

En la figura 8, se ilustra la curva del coeficiente de cultivo de la quinua (K_c), en sus diferentes fases fenológicas durante todo el período vegetativo; en el cual los valores de K_c varían de acuerdo al desarrollo del cultivo.

Las necesidades de agua de los cultivos, varían en forma gradual de una fase a otra, con requerimientos mínimos durante su fase inicial ($K_c = 0.5$) donde la superficie del suelo está apenas cubierto por el cultivo, ascendiendo un poco en la fase de desarrollo ($K_c = 0.7$) alcanzando su máximo en la fase media estación ($K_c = 1.2$) y disminuyendo en el estadio final ($K_c = 0.7$); esto determina un curso similar de los coeficientes K_c .

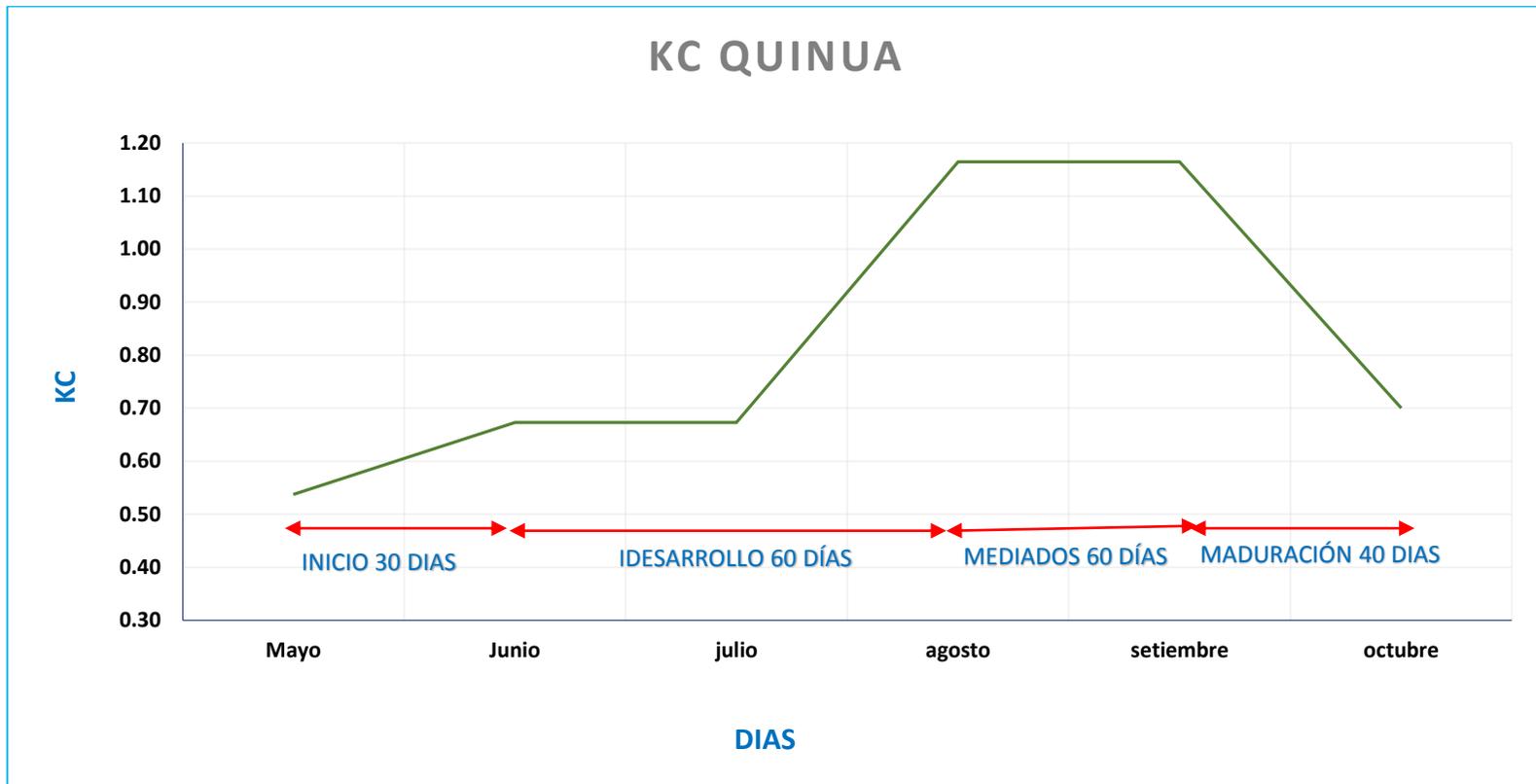


Figura 8 Curva del Coeficiente de Uso Consuntivo (Kc) del cultivo de Quinua por estado fenológico

Fuente: Elaboración Propia.

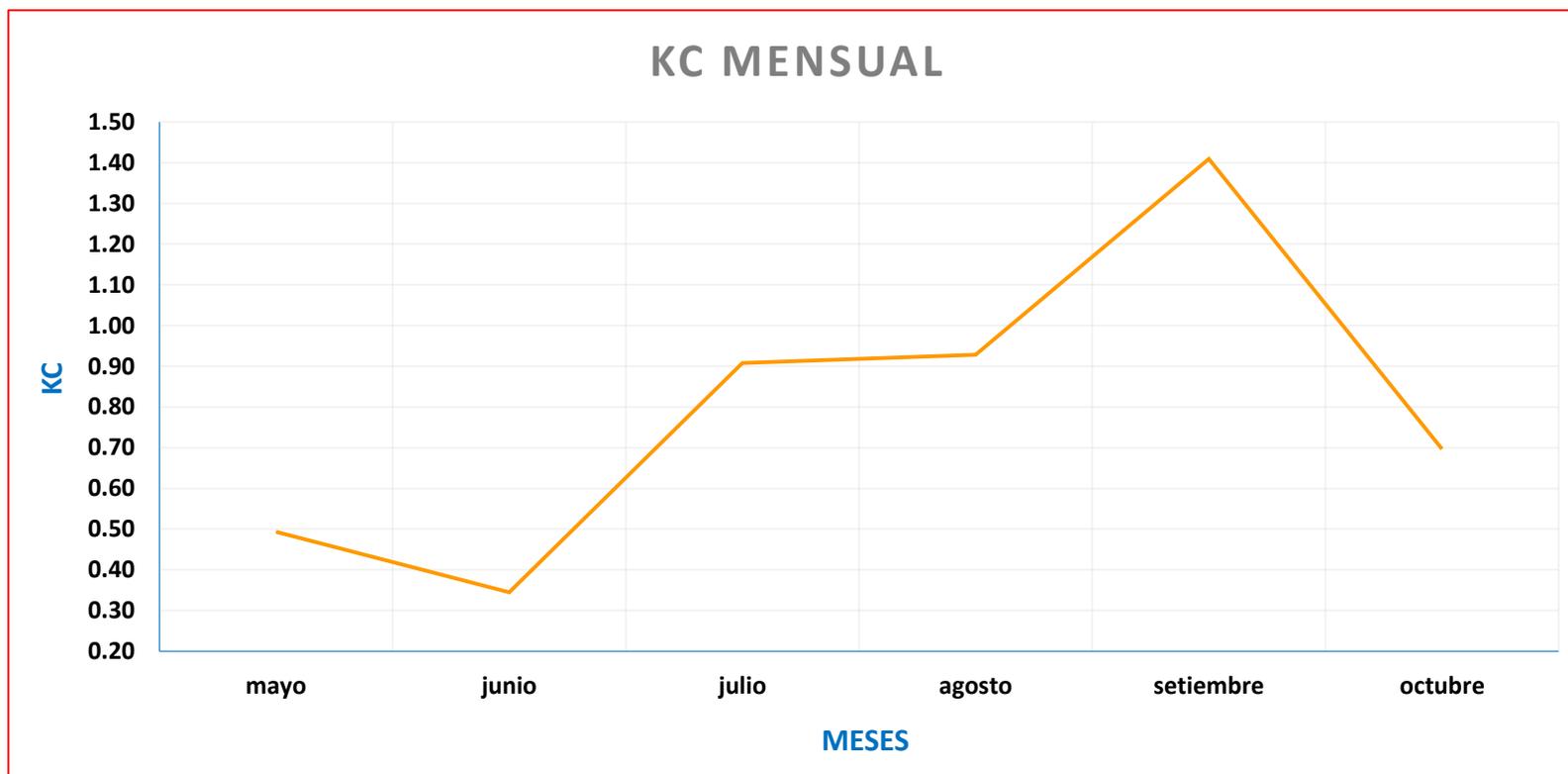


Figura 9 Curva del Coeficiente de Cultivo (Kc) del cultivo de Quinoa mensual

Fuente: Elaboración Propia.

V. CONCLUSIONES

1. Los valores de coeficientes de uso consuntivo K_c de quinua fueron determinados usando los datos lisimétricos de ETR y ETo. La curva de K_c sigue el mismo patrón que cualquier cultivo comercial con una fase inicial de bajo consumo K_c inicial = 0.5, una fase de desarrollo con incremento dinámico en el consumo de agua K_c desarrollo = 0.7, una fase estable de mediados de temporada K_c medio = 1.2 y una fase final de senescencia con descenso en el consumo de agua K_c final = 0.7. Atribuible a las condiciones dadas en el lisímetro en la relación agua – suelo – planta. Lo que se confirmó es que los valores de K_c de quinua no corresponden a los de los cereales y, por tanto, es inadecuado calcular los requerimientos de riego de quinua adaptando el K_c de otros cultivos.
2. El valor promedio de coeficiente de cultivo es 0.8.
3. La evapotranspiración del cultivo de quinua variedad salcedo INIA obtenido por el método del lisímetro fue de 900.4 mm por todo el período vegetativo.
4. Las tasa de evapotranspiración potencial estimadas a partir de las fórmulas empíricas basadas en datos meteorológicos presentan variaciones, probablemente se deben a las variables que intervienen en los cálculos y a la sensibilidad de estas a los factores predominantes de la zona. (temperatura, humedad relativa, precipitación y horas de insolación).
5. Se ha encontrado que las ecuaciones de Turc (19.6%), Thornthwaite (21.4%) y Hargreaves con temperatura (22.7%) presentan menor error relativo en comparación con los datos lisimétricos.

VI. RECOMENDACIONES

1. Es necesario realizar estudios similares durante varios años en los diferentes pisos ecológicos de nuestra región, a fin de obtener información sobre la evapotranspiración potencial y evapotranspiración real de cualquier cultivo y armar una base de datos para la implementación de riego racional en el futuro.
2. A causa del corto tiempo de la evaluación se hace necesario complementar y mejorar el presente trabajo de investigación para otras épocas del año y otras zonas de la región.
3. Recomiendo utilizar el Lisímetro de drenaje o volumétrico que es el que se utilizó en este experimento, de forma circular para cultivos que se siembren al voleo y de forma rectangular para cultivos que utilicen distanciamiento de siembra puesto que facilita las labores culturales.
4. Para la planificación y ejecución de los proyectos agrícolas de irrigación, se recomienda usar para la zona de Huaraz las ecuaciones de Turc y Thornthwaite, que son las que dieron menor error relativo.
5. No se recomienda utilizar la ecuación de Blaney-Criddle puesto que su porcentaje de error es el más alto y sobre estima el valor experimental de la evapotranspiración de referencia.

VII. BIBLIOGRAFIA

1. ALLEN, R; PEREIRA, L; RAES, D; SMITH, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Estudio Riego y Drenaje, FAO N°56. Roma, Italia.
2. APARICIO MIJARES, FJ. 1994. Fundamentos de Hidrología de superficie. Editorial Limusa. México, MX. 303 Pág.
3. BOCHETTI VLADILIO M.J. 2010. Análisis Comparativo de la Evapotranspiración Obtenida Mediante Distintas Ecuaciones Empíricas Aplicadas a las Zonas Agrícolas de Chillan. Tesis Ing. Civil. Concepción, UCSC. 59 pág.
4. CALAPUJA AYAMAMANÍ, RF. 2012. “Determinación de la Evapotranspiración real del cultivo de Oca (*Oxalis tuberosa* MOL.) En el CIP – ILLPA-PUNO”. Tesis Ing. Agr. Puno-Perú. 115 pág.
5. CASTAÑON, G. S.F. Ingeniería del Riego “Utilización Racional del Agua”. Editorial Thomson Paraninfo. España, Madrid. 198 pág.
6. CITRA (Centro de Investigación y Transferencia en Riego y Agroclimatología) Facultad de Ciencias Agrarias Universidad de Talca. S.f. Servicio de Programación y Optimización del Uso del Agua de Riego. Consultado el 22 de septiembre del 2013. Disponible en http://www.sepor.cl/informacion_boletines/S106_Boletin_Coeficiente_de_cultivo.pdf.
7. CISNEROS ALMAZÁN, R. 2003. Estudios de Riego y Drenaje. Centro de Investigación y Estudios de Posgrado. Área Agrogeodésica. UASLP. México.
8. CHOQUECALLATA J., VACHER J., FELLMANN T. E IMAÑA E. Evapotranspiración Máxima del Cultivo de la Quinoa por lisimetría y su Relación con la Evapotranspiración Potencial en el Altiplano Boliviano. (1989 – 1990). Consultado el 31 de Agosto del 2013. Disponible en http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers09-11/38551.pdf.

9. DOOREMBOS J. Y PRUITT W. 1976. Necesidades de Agua de los Cultivos. Roma. 194 pág.
10. ESMERAL VARGAS, YR. 2011. Análisis de la Evapotranspiración Real en el Cultivo de Rosa. Tesis Mag. Ing. Agr. Bogotá D.C. 94 pág.
11. GARCIA, M., DIRK R., Y JACOBSEN, SE. (2002). Análisis de la Evapotranspiración de Referencia en el Altiplano Boliviano y Determinación de los Requerimientos de Riego de Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). (en línea). La Paz, BO. Universidad Mayor de San Andrés (UMSA). Consultado el 20 Julio del 2013. Disponible en <http://www.rlc.fao.org/es/agricultura/produ/cdrom/contenido/libro14/cap3.14.htm>.
12. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2006. (E I). Evapotranspiración del Cultivo: Guías para la Determinación de los Requerimientos de Agua para los Cultivos (En línea). Cuaderno Técnico FAO Publicación N° 56 Estudio Riego y Drenaje. Consultado el 20 Julio del 2013. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/009/x0490s/x0490s00.htm>.
13. GUEVARA PÉREZ EDILBERTO. 1991. Hidrología “Una Introducción a la Ciencia” EGN Comunicaciones. Valencia Venezuela. 357 pág.
14. HONORAT P, R. S.F. Manual de Edafología. 4^{ta} Edición. Editorial Alfa omega. México, D.F. 267 pág.
15. ISRAELSEN, O. Y HANSEN, V. 1965. Principios y Aplicaciones del Riego. 2° Edición. Editorial Reverté S.A. Barcelona. España. 663 pág.
16. LAZO PEREZ CJ. 2006. Tecnología para el Riego. Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica CONCYTEC. Lima-Perú. 235 pág.
17. LEÓN HANCCO, J.M. 2003. Cultivo de la Quinoa en Puno – Perú: Descripción, Manejo y Producción. Tesis Ing. Agr. (en línea). Puno PE. Universidad Nacional de Puno – Facultad de Ciencias Agrarias. 63 p. Consultado el 05 de Setiembre del 2013 disponible en <http://www.monografias.com/trabajos-pdf/cultivo-quinua-puno-peru/cultivo-quinua-puno-peru.pdf>.

18. MEJÍA, MA (2001). Hidrología Aplicada. “Universidad Nacional Agraria la Molina”. Lima. Centro de Impresiones y Publicaciones – Facultad de Ingeniería Agrícola (CIP-FIA). Volumen 2. 188 pág.
19. MOJARRO DAVILA F. 1975. Proyecto de un Lisímetro de Estructura Inalterada y de Drenaje. Tesis Ing. Agr. Guadalajara-México. 65 pág.
20. OLARTE HURTADO W. 1987. Manual de Riego por Gravedad. Comunicación de Coordinación de Tecnología Andina (CCTA). Lima-Perú. 148 pág.
21. PORRAS JORGE, ZR. 2015. Evaluación del sistema de riego por goteo y exudación en el cultivo de quinua (*Chenopodium Quinoa Willd*) en el INIA –la molina. Tesis Ing. Agr. Lima-Perú. 113 pág.
22. SANCHEZ M.M Y CARVACHO B.L. 2011. Comparación de Ecuaciones Empíricas para el Cálculo de la Evapotranspiración de Referencia en la Región del Libertador. Instituto de Geografía Pontificia Universidad Católica de Chile. Revista de Geografía Norte Grande N°50. 186 pág.
23. TUÑÓN COLOM, J. 2000. Determinación Experimental del Balance Hídrico del Suelo Y Evaluación de la Contaminación Asociada a las Prácticas Agrícolas. Tesis PhD. 367 pág.
24. Vásquez, VA y Navarro, LL. (1992). El Riego Principios Básicos. Urb. El Palomar, San Isidro. PE. Impreso en los Talleres de la ONERN. Tomo I. 160 pág.
25. Vásquez, VA; Vásquez, RI. Y Vílchez, OG. (S.f.). Principios Básicos del Riego. Breña. PE. Impreso en los Talleres Gráficos de FIMART S.A.C. 263 pág.

ANEXO A:

Evapotranspiración de referencia medida

Para la obtención de la evapotranspiración de referencia medida experimentalmente se instaló en el área experimental 01 lisímetro en el que se procedió así:

CUADRO A

PERIODO	PP mm. acumulada	L.A mm	L.P mm	ETo mm/día Ponderado	ETo mm/día	ETo mm/mes
30 ABRIL - 02 MAY		19.31	0.560	9.375	18.75	3.676
03 MAY - 14 MAY		35.266	11.951	2.229	24.515	
15 MAY - 20 MAY	1.2	9.796	0.00	3.139	15.696	
21 MAY - 23 MAY	5.90	9.796	0.00	5.898	11.796	
24 MAY - 26 MAY	2.00	9.796	0.00	5.898	11.796	
27 MAY - 28 MAY	2.00	9.796	0.00	11.796	11.796	
29 MAY - 30 MAY	2.00	9.796	0.00	9.796	9.796	
31 MAY - 01 JUN.		9.796	0.00	9.796	9.796	
02 JUN - 03 JUN.		9.796	0.00	12.796	12.796	4.944
04 JUN - 06 JUN	3	9.796	0.00	4.898	9.796	
07 JUN - 08 JUN		9.796	0.00	11.096	11.096	
09 JUN - 10 JUN	1.3	9.796	0.00	9.796	9.796	
11 JUN -		9.796	0.00	9.796	9.796	
12 JUN -		9.796	0.00	9.796	9.796	
13 JUN - 14 JUN		9.796	0.00	9.796	9.796	
15 JUN - 16 JUN		9.796	0.00	9.796	9.796	
17 JUN -		9.796	0.00	9.796	9.796	
18 JUN - 19 JUN		9.796	0.00	9.796	9.796	
20 JUN - 22 JUN		9.796	0.00	4.898	9.796	
23 JUN - 24 JUN		9.796	0.00	9.796	9.796	
25 JUN - 27 JUN		9.796	0.00	4.898	9.796	
28 JUN - 29 JUN		9.796	0.00	9.796	9.796	
30-jun		9.796	0.00	9.796	9.796	
01 JUL - 02 JUL		9.796	0.00	9.996	9.996	6.881
03 JUL - 05 JUL	0.2	31.348	7.147	12.101	24.201	
06 JUL - 08 JUL		31.348	6.136	12.606	25.212	
09 JUL - 12 JUL		31.348	9.718	7.210	21.63	
13 JUL - 17 JUL		31.348	0.431	7.729	30.917	
18 JUL - 20 JUL		31.348	4.130	13.609	27.218	
21 JUL - 24 JUL		31.348	7.759	7.863	23.589	
25 JUL - 28 JUL		31.348	6.23	8.373	25.118	
29 JUL - 31 JUL		31.348	5.929	12.710	25.419	

01 AGOS - 02 AGOS		31.348	11.223	20.125	20.125	6.132
03 AGOS - 07 AGOS		31.348	14.028	4.355	17.42	
08 AGOS - 10 AGOS	0.1	31.348	3.824	13.762	27.524	
11 AGOS - 14 AGOS		31.348	2.453	9.665	28.995	
15 AGOS - 17 AGOS	0.1	31.348	4.663	13.393	26.785	
18 AGOS - 21 AGOS	0.1	31.348	15.313	5.345	16.035	
22 AGOS - 24 AGOS		31.348	13.715	8.817	17.633	
25 AGOS - 28 AGOS		31.348	15.948	5.133	15.4	
29 AGOS - 31 AGOS		31.348	11.179	10.085	20.169	
01 SET - 04 SET		31.348	15.219	5.376	16.129	5.936
05 SET - 07 SET		31.348	13.55	8.899	17.798	
08 SET - 11 SET		31.348	19.984	3.788	11.364	
12 SET - 15 SET		31.348	15.760	5.196	15.588	
16 SET - 18 SET		31.348	15.282	8.033	16.066	
19 SET - 20 SET		31.348	6.622	26.526	26.526	
21 SET - 22 SET	1.8	31.348	17.618	17.530	17.53	
24 SET - 26 SET	3.8	31.348	12.931	13.509	27.017	
27 SET - 29 SET	8.6	31.348	19.859	9.095	18.189	
30 SET 03 OCT	6.7	31.348	17.116	5.877	17.632	8.875
04 OCT - 06 OCT	3.4	31.348	19.608	11.020	22.040	
07 OCT - 09 OCT	10.3	31.348	21.270	8.039	16.078	
10 OCT - 11 OCT	6	31.348	14.937	17.111	17.111	
12 OCT - 13 OCT	0.7	31.348	16.066	18.182	18.182	
14 OCT - 16 OCT	2.9	31.348	13.715	8.817	17.633	
17 OCT - 18 OCT		31.348	13.636	20.912	20.912	
19 OCT - 20 OCT	3.2	31.348	18.252	14.096	14.096	
21 OCT 23 OCT	1	31.348	10.118	11.465	22.930	
24 OCT.	1.7	31.348	4.976	26.371	26.371	
25 OCT.	0	31.348	9.796	21.552	21.552	
26 OCT.	0	31.348	17.719	13.629	13.629	
27 OCT.	0	31.348	16.967	14.381	14.381	
28 OCT.	0	15.674	7.900	7.774	7.774	
29 OCT - 30 OCT	0	15.674	2.382	13.292	13.292	
31 OCT - 01 NOV	0	31.348	10.972	20.376	20.376	

Fuente: Elaboración Propia.

ANEXO B

Evapotranspiración del cultivo de Quinoa medida con los lisímetros.

LISÍMETRO N° 01							
PERIODO	PP mm. acumulada	L.A mm	L.P mm	N° Días	ETR mm/día	ETR mm/día Ponderada	ETR mm/mes
01 MAY. - 08 MAY.		3.918		7	0.560	3.918	1.813
09 MAY. - 14 MAY.	1.2	3.918		5	1.024	5.118	
15 MAY. - 21 MAY.	5.9	5.878		6	1.963	11.778	
22 MAY. - 24 MAY.	2.0	5.878		2	3.939	7.878	
25 MAY. - 26 MAY.	2.0	5.878		1	7.878	7.878	
27 MAY. - 28 MAY.	2.0	5.878		1	7.878	7.878	
29 MAY. - 30 MAY.		5.878		1	5.878	5.878	
31 MAY. - 01 JUN.		5.878		1	5.878	5.878	
02 JUN. - 06 JUN.	3.0	5.878		4	2.219	8.878	
07 JUN. - 09 JUN.	1.5	5.878		2	3.689	7.378	1.706
10 JUN. - 13 JUN.		5.878		3	1.959	5.878	
14 JUN. - 21 JUN.		5.878		7	0.840	5.878	
22 JUN. - 25 JUN.		9.013		3	3.004	9.013	
26 JUN. - 29 JUN.		7.837		3	2.612	7.837	
30 JUN - 02 JUL.	0.2	7.837		2	4.018	8.037	
03 JUL. - 07 JUL.		31.348	11.074	4	5.069	20.274	5.586
08 JUL. - 12 JUL.		31.348	13.393	4	4.489	17.955	
13 JUL. - 18 JUL.		31.348	10.165	5	4.237	21.183	
19 JUL. - 22 JUL.		31.348	4.067	3	9.094	27.281	
23 JUL. - 28 JUL.		39.185	10.063	5	5.824	29.122	
29 JUL. - 31 JUL.		39.185	8.600	2	15.293	30.585	
01 AGO. - 02 AGO		39.180	18.009	1	21.171	21.171	4.922
03 AGO. - 07 AGO	0.1	23.511	3.621	4	4.998	19.990	
08 AGO. - 10 AGO.		31.348	9.013	2	11.168	22.335	
11 AGO. - 14 AGO	0.1	31.348	15.071	3	5.459	16.377	
15 AGO. - 17 AGO	0.1	31.348	11.520	2	9.964	19.928	
18 AGO. - 21 AGO		31.348	14.498	3	5.617	16.850	
21 AGO. - 24 AGO.		31.348	15.392	3	5.319	15.956	
25 AGO. - 28 AGO.		31.348	16.520	3	4.943	14.828	
29 AGO. - 04 SET.		31.348	0.118	6	5.205	31.230	8.141
05 SEPT. - 07 SEPT.		31.348	6.998	2	12.175	24.350	
08 SEPT. - 11 SEPT.		23.511	2.625	3	6.962	20.886	
12 SEPT. - 15 SEPT.		31.348	1.434	3	9.971	29.914	
16 SEPT. - 18 SEPT.		31.348	0.392	2	15.478	30.956	
19 SEPT. - 21 SEPT.	1.8	35.266	3.918	2	16.574	33.148	
22 SEPT. - 26 SEPT.	12.4	39.185	17.633	4	8.488	33.952	
27 SEPT. - 29 SEPT.	6.7	31.348	4.165	2	16.941	33.883	
30 SEPT. - 04 OCT.	3.4	39.184	11.270	4	7.829	31.315	5.421
05 OCT. - 06 OCT.	1	31.348	10.250	1	22.098	22.098	
07 OCT. - 09 OCT.	6.0	31.348	12.817	2	12.266	24.531	
10 OCT. - 16 OCT.	3.6	31.348	13.911	6	3.506	21.037	
17 OCT. - 21 OCT.	3.2	31.348	2.665	4	7.971	31.883	
22 OCT. - 28 OCT.	1.0	31.348	8.205	6	4.024	24.143	
29 OCT. - 02 NOV.	0	31.348	3.260	4	7.022	28.088	

LISÍMETRO N° 02						
PERIODO	L.A mm	L.P mm	N° Días	ETR mm/día	ETR mm/día Ponderada	ETR mm/mes
01 MAY. - 08 MAY.	3.918		7	0.560	3.918	1.813
09 MAY. - 14 MAY.	3.918		5	1.024	5.118	
15 MAY. - 21 MAY.	5.878		6	1.963	11.778	
22 MAY. - 24 MAY.	5.878		2	3.939	7.878	
25 MAY. - 26 MAY.	5.878		1	7.878	7.878	
27 MAY. - 28 MAY.	5.878		1	7.878	7.878	
29 MAY. - 30 MAY.	5.878		1	5.878	5.878	
31 MAY. - 01 JUN.	5.878		1	5.878	5.878	
02 JUN. - 06 JUN.	5.878		4	2.219	8.878	
07 JUN. - 09 JUN.	5.878		2	3.689	7.378	
10 JUN. - 13 JUN.	5.878		3	1.959	5.878	
14 JUN. - 21 JUN.	5.878		7	0.840	5.878	
22 JUN. - 25 JUN.	9.013		3	3.004	9.013	
26 JUN. - 29 JUN.	7.837		3	2.612	7.837	
30 JUN - 02 JUL.	7.837		2	4.018	8.037	6.244
03 JUL. - 07 JUL.	31.348	7.461	4	5.972	23.887	
08 JUL. - 12 JUL.	31.348	11.207	4	5.035	20.141	
13 JUL. - 18 JUL.	31.348	5.345	5	5.201	26.003	
19 JUL. - 22 JUL.	31.348	0.439	3	10.303	30.909	
23 JUL. - 28 JUL.	39.185	6.293	5	6.578	32.892	
29 JUL. - 31 JUL.	39.185	2.900	2	18.143	36.285	5.974
01 AGO. - 02 AGO	39.180	21.983	1	17.197	17.197	
03 AGO. - 07 AGO	23.511	3.009	4	5.150	20.602	
08 AGO. - 10 AGO.	31.348	0.980	2	15.184	30.368	
11 AGO. - 14 AGO	31.348	17.594	3	4.618	13.854	
15 AGO. - 17 AGO	31.348	0.745	2	15.352	30.703	
18 AGO. - 21 AGO	31.348	6.497	3	8.284	24.851	
21 AGO. - 24 AGO.	31.348	13.542	3	5.935	17.806	
25 AGO. - 28 AGO.	31.348	9.702	3	7.215	21.646	8.530
29 AGO. - 04 SET.	31.348		6	5.225	31.348	
05 SEPT. - 07 SEPT.	31.348	2.398	2	14.475	28.950	
08 SEPT. - 11 SEPT.	23.511	0.102	3	7.803	23.409	
12 SEPT. - 15 SEPT.	31.348	7.837	3	7.837	23.511	
16 SEPT. - 18 SEPT.	31.348	0.392	2	15.478	30.956	
19 SEPT. - 21 SEPT.	35.266	0.086	2	18.490	36.980	
22 SEPT. - 26 SEPT.	39.185	1.058			50.527	
27 SEPT. - 29 SEPT.	31.348	6.324	2	15.862	31.724	7.795
30 SEPT. - 04 OCT.	39.185	12.743	4	7.461	29.842	
05 OCT. - 06 OCT.	31.348	10.055	1	22.293	22.293	
07 OCT. - 09 OCT.	31.348	11.296	2	13.526	27.052	
10 OCT. - 16 OCT.	31.348	5.500	6	12.924	77.544	
17 OCT. - 21 OCT.	31.348	8.890	4	13.329	53.316	
22 OCT. - 28 OCT.	31.348	7.720	6	3.938	23.628	
29 OCT. - 02 NOV.	31.348	16.928	4	3.605	14.420	

LISÍMETRO N° 03							
PERIODO	L.A mm	L.P mm	N° Días	ETR mm/día	ETR mm/día Ponderada	ETR mm/mes	
01 MAY. - 08 MAY.	3.918		7	0.560	3.918	1.813	
09 MAY. - 14 MAY.	3.918		5	1.024	5.118		
15 MAY. - 21 MAY.	5.878		6	1.963	11.778		
22 MAY. - 24 MAY.	5.878		2	3.939	7.878		
25 MAY. - 26 MAY.	5.878		1	7.878	7.878		
27 MAY. - 28 MAY.	5.878		1	7.878	7.878		
29 MAY. - 30 MAY.	5.878		1	5.878	5.878		
31 MAY. - 01 JUN.	5.878		1	5.878	5.878		
02 JUN. - 06 JUN.	5.878		4	2.219	8.878		1.706
07 JUN. - 09 JUN.	5.878		2	3.689	7.378		
10 JUN. - 13 JUN.	5.878		3	1.959	5.878		
14 JUN. - 21 JUN.	5.878		7	0.840	5.878		
22 JUN. - 25 JUN.	9.013		3	3.004	9.013		
26 JUN. - 29 JUN.	7.837		3	2.612	7.837		
30 JUN - 02 JUL.	7.837		2	4.018	8.037	6.919	
03 JUL. - 07 JUL.	31.348		4	7.837	31.348		
08 JUL. - 12 JUL.	31.348	16.552	4	3.699	14.796		
13 JUL. - 18 JUL.	31.348	4.185	6	4.527	27.163		
19 JUL. - 22 JUL.	31.348		4	7.837	31.348		
23 JUL. - 28 JUL.	39.185	2.226	3	12.320	36.959		
29 JUL. - 31 JUL.	39.185	0.000	2	19.593	39.185	6.178	
01 AGO. - 02 AGO	39.180	12.422	1	26.758	26.758		
03 AGO. - 07 AGO	23.511	2.226	4	5.346	21.385		
08 AGO. - 10 AGO.	31.348	3.597	2	13.875	27.751		
11 AGO. - 14 AGO	31.348	13.738	3	5.903	17.710		
15 AGO. - 17 AGO	31.348	2.296	2	14.576	29.152		
18 AGO. - 21 AGO	31.348	8.119	3	7.743	23.229		
21 AGO. - 24 AGO.	31.348	6.560	3	8.263	24.788		
25 AGO. - 28 AGO.	31.348	9.013	3	7.445	22.335	8.290	
29 AGO. - 04 SET.	31.348		6	5.225	31.348		
05 SEPT. - 07 SEPT.	31.348	2.625	2	14.361	28.723		
08 SEPT. - 11 SEPT.	23.511		3	7.837	23.511		
12 SEPT. - 15 SEPT.	31.348	1.113	3	10.078	30.235		
16 SEPT. - 18 SEPT.	31.348	0.392	2	15.478	30.956		
19 SEPT. - 21 SEPT.	35.266	0.376	2	18.345	36.690		
22 SEPT. - 26 SEPT.	39.185	0.784	4	12.700	50.801		
27 SEPT. - 29 SEPT.	31.348	18.417	2	9.816	19.631	5.426	
30 SEPT. - 04 OCT.	41.928	17.163	4	7.041	28.165		
05 OCT. - 06 OCT.	31.348	17.437	1	14.911	14.911		
07 OCT. - 09 OCT.	31.348	15.674	2	10.837	21.674		
10 OCT. - 16 OCT.	31.348	12.147	6	3.800	22.801		
17 OCT. - 21 OCT.	31.348	0.157	4	8.848	35.391		
22 OCT. - 28 OCT.	31.348	0.439	6	5.152	30.909		
29 OCT. - 02 NOV.	31.348	5.094	4	6.563	26.254		

ANEXO C

Datos Meteorológicos Mensuales para un período de 10 años 2007 – 2016

Cuadro C-1

PARÁMETRO: HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL (%)												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2007	83.1	79.9	87.8	86.9	79.1	75.0	67.3	66.5	60.3	67.1	74.5	71.5
2008	80.4	81.3	81.4	78.3	69.6	62.6	60.5	61.2	60.9	73.3	73.2	67.2
2009	77.7	79.9	81.7	77.1	71.4	63.3	58.8	60.2	56.5	75.7	73.5	78.8
2010	75.7	74.3	76.0	75.1	67.5	73.4	71.6	62.7	70.8	76.1	79.2	86.0
2011	83.9	79.1	86.4	S/D	74.4	69.2	65.1	66.5	70.2	68.2	75.1	79.4
2012	81.4	81.1	82.2	83.3	75.3	66.7	62.8	60.7	65.9	69.8	S/D	70.3
2013	70.3	77.5	79.1	70.5	67.7	62.3	58.2	64.9	63.5	72.7	69.4	74.9
2014	76.3	78.1	81.9	76.3	75.4	67.8	S/D	77.8	73.9	76.9	73.3	81.6
2015	S/D	78.1	80.7	80.6	S/D	S/D	S/D	S/D	66.6	70.3	73.0	S/D
2016	72.0	78.8	73.5	71.5	64.6	58.8	54.3	52.3	65.6	S/D	S/D	S/D
PROM.	77.9	78.8	81.1	77.7	71.7	66.6	62.3	63.6	65.4	72.2	73.9	76.2

Fuente: SENAMHI.

Cuadro C-2

PARAMETRO: TOTAL HORAS DE SOL (HORAS Y DECIMAS DE SOL)												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2007	204.7	184.4	154.2	207.4	240.5	272.5	292.0	290.6	238.6	218.4	225.1	169.6
2008	168.7	143.6	150.8	183.8	247.9	249.1	273.5	272.3	234.4	173.1	196.0	219.8
2009	182.5	110.0	180.1	S/D	234.4	267.9	271.4	282.2	252.3	166.1	164.6	118.5
2010	180.3	164.6	171.0	208.4	238.1	244.9	254.7	263.3	217.3	197.1	161.6	99.2
2011	144.4	106.1	129.2	S/D	255.7	258.4	258.0	275.2	200.4	188.4	172.9	138.9
2012	156.8	136.6	189.1	166.1	228.7	260.3	283.6	271.3	221.8	179.9	S/D	82.8
2013	212.9	133.7	135.0	215.1	176.5	244.4	278.8	247.6	245.5	177.9	177.0	189.6
2014	157.5	132.2	142.5	201.1	223.1	261.1	S/D	248.9	207.8	177.4	202.4	139.4
2015	S/D	150.2	162.8	175.1	S/D	S/D	S/D	S/D	223.2	210.4	179.2	S/D
2016	223.8	146.0	205.3	223.5	264.2	253.5	290.5	271.7	220.5	S/D	S/D	S/D
PROM.	181.3	140.7	162.0	197.6	234.3	256.9	275.3	269.2	226.2	187.6	184.9	144.7

Fuente: SENAMHI.

Cuadro C-3

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL °C												
AÑO	ENE.	FE.B	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC
2007	15.3	14.7	13.6	14.0	14.2	13.6	13.9	13.7	14.6	14.2	14.4	13.7
2008	13.3	13.3	12.7	13.6	13.4	13.0	12.6	13.9	14.4	14.0	14.1	14.0
2009	13.6	13.4	13.3	14.2	13.9	14.2	13.8	14.4	15.3	14.0	14.2	13.9
2010	14.9	15.4	14.8	15.4	14.7	14.0	13.8	13.9	14.5	14.3	13.4	12.7
2011	13.4	13.4	13.0	S/D	14.4	14.0	13.8	14.5	14.7	14.3	14.6	13.9
2012	14.3	13.5	14.2	13.8	14.4	13.7	13.8	13.9	14.5	14.9	S/D	14.2
2013	15.8	14.2	14.3	15.0	14.3	14.0	13.7	14.4	15.4	14.9	14.4	14.7
2014	14.5	14.2	13.9	15.0	14.6	14.4	S/D	14.2	14.9	14.8	15.1	14.5
2015	S/D	14.7	14.7	14.4	S/D	S/D	S/D	S/D	15.5	15.5	15.1	S/D
2016	16.2	15.5	15.7	15.4	15.2	14.1	13.9	14.8	14.9	S/D	S/D	S/D
PROM.	14.6	14.2	14.0	14.5	14.3	13.9	13.6	14.2	14.9	14.5	14.4	13.9

Fuente: SENAMHI.

Cuadro C-4

PRECIPITACIÓN (mm)												
AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
2007	96.2	87.0	170.1	186.9	31.8	0.7	6.9	0.9	8.0	102.2	57.8	62.1
2008	160.8	148.2	108.0	86.1	2.2	7.4	9.8	3.1	23.7	133.1	43.9	94.9
2009	178.5	141.6	225.6	118.4	30.2	9.1	0.3	2.2	2.0	150.5	137.4	187.0
2010	102.3	49.4	124.5	71.9	46.2	6.1	0.0	3.4	27.8	29.2	109.0	191.5
2011	90.4	68.2	108.1		0.7	0.0	4.1	1.1	11.0	28.2	98.9	160.3
2012	104.0	142.6	193.2	180.2	17.8	5.9	0.0	0.0	26.4	42.6	S/D	110.3
2013	88.7	137.6	170.5	39.8	21.4	0.0	0.4	4.7	5.9	97.6	67.6	146.6
2014	124.5	186.1	170.3	91.1	74.4	7.1	S/D	3.9	34.9	47.7	53.0	196.3
2015	S/D	S/D	135.6	84.3	S/D	S/D	S/D	S/D	20.3	74.1	92.8	S/D
2016	59.2	175.4	119.5	52.1	13.1	4.5	0.2	0.4	S/D	S/D	S/D	S/D
PROM	111.6	126.2	152.5	101.2	26.4	4.5	2.7	2.2	17.8	78.4	82.6	143.6

Fuente: SENAMHI.

Cuadro C-5: Porcentaje diario medio (p) de horas anuales a diferentes latitudes

LATITUD NORTE	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
LATITUD SUR	Julio	Agosto	Sept.	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
60	0.15	0.20	0.26	0.32	0.38	0.41	0.41	0.34	0.28	0.22	0.17	0.13
58	0.16	0.21	0.26	0.32	0.37	0.40	0.40	0.34	0.28	0.23	0.18	0.15
56	0.17	0.21	0.26	0.32	0.36	0.39	0.39	0.33	0.28	0.23	0.18	0.16
54	0.18	0.22	0.26	0.31	0.36	0.38	0.38	0.33	0.28	0.23	0.19	0.17
52	0.19	0.22	0.27	0.31	0.35	0.37	0.37	0.33	0.28	0.24	0.20	0.17
50	0.19	0.23	0.27	0.31	0.34	0.36	0.36	0.32	0.28	0.24	0.20	0.18
48	0.20	0.23	0.27	0.31	0.34	0.36	0.36	0.32	0.28	0.24	0.21	0.19
46	0.20	0.23	0.27	0.30	0.34	0.35	0.35	0.32	0.28	0.24	0.21	0.20
44	0.21	0.24	0.27	0.30	0.33	0.35	0.35	0.31	0.28	0.25	0.22	0.20
42	0.21	0.24	0.27	0.30	0.33	0.34	0.34	0.31	0.28	0.25	0.22	0.21
40	0.22	0.24	0.27	0.30	0.32	0.34	0.34	0.31	0.28	0.25	0.22	0.21
35	0.23	0.25	0.27	0.29	0.31	0.32	0.32	0.30	0.28	0.25	0.23	0.22
30	0.24	0.25	0.27	0.29	0.31	0.32	0.32	0.30	0.28	0.26	0.24	0.23
25	0.24	0.26	0.27	0.29	0.30	0.31	0.31	0.29	0.28	0.26	0.25	0.24
20	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.30	0.29	0.28	0.26	0.25	0.25
15	0.26	0.26	0.27	0.28	0.29	0.29	0.29	0.28	0.28	0.27	0.26	0.25
10	0.26	0.27	0.27	0.28	0.28	0.29	0.29	0.28	0.28	0.27	0.26	0.26
5	0.27	0.27	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.27	0.27	0.27
0	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27

Fuente: FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER 1977 (ROMA).

Cuadro C 6: Duración máxima media de las horas de fuerte insolación (n) en diferentes meses y latitudes.

LAT. NORTE	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
LAT. SUR	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.
50	8.5	10.1	11.8	13.8	15.4	16.3	15.9	14.5	12.7	10.8	9.1	8.1
48	8.8	10.2	11.8	13.6	15.2	16.0	15.6	14.3	12.6	10.9	9.3	8.3
46	9.1	10.4	11.9	13.5	14.9	15.7	15.4	14.2	12.6	10.9	9.5	8.7
44	9.3	10.5	11.9	13.4	14.7	15.4	15.2	14.0	12.6	11.0	9.7	8.9
42	9.4	10.6	11.9	13.4	14.6	15.2	14.9	13.9	12.9	11.1	9.8	9.1
40	9.6	10.7	11.9	13.3	14.4	15.0	14.7	13.7	12.5	11.2	10.0	9.3
35	10.1	11	11.9	13.1	14.0	14.5	14.3	13.5	12.4	11.3	10.3	9.8
30	10.4	11.1	12.0	12.9	13.6	14.0	13.9	13.2	12.4	11.5	10.6	10.2
25	10.7	11.3	12.0	12.7	13.3	13.7	13.5	13.0	12.3	11.6	10.9	10.6
20	11	11.5	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
15	11.3	11.6	12.0	12.5	12.8	13	12.9	21.6	12.2	11.8	11.4	11.2
10	11.6	11.8	12.0	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.8	11.6	11.5
5	11.8	11.9	12.0	12.2	12.3	12.4	12.3	12.3	12.1	12.0	11.9	11.8
0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1

Fuente: FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER 1977 (ROMA).

Cuadro C 7: Constantes a y b para estimar la evapotranspiración potencial en función de la hr, n/n en diferentes meses y velocidad de viento.

n/N: 0.3 – 0.6

Humedad Relativa HR (%)	VELOCIDAD DE VIENTO DIURNO (m/seg)					
	0 a 2		2 a 5		> 5	
	A	B	A	B	A	B
< 20	-1.900	1.266	-1.800	1.433	-1.850	1.616
20 - 50	-1.700	1.100	-1.600	1.200	-1.750	1.350
> 50	-1.700	0.900	-1.530	0.933	-1.866	1.066

n/N: 0.6 – 0.8

Humedad Relativa HR (%)	VELOCIDAD DE VIENTO DIURNO (m/seg)					
	0 a 2		2 a 5		> 5	
	A	B	A	B	A	B
< 20	-2.000	1.433	-1.900	1.633	-1.800	1.866
20 - 50	-2.200	1.333	-2.000	1.433	-1.900	1.566
> 50	-1.733	1.033	-1.700	1.100	-1.566	1.166

n/N: > 0.8

Humedad Relativa HR (%)	VELOCIDAD DE VIENTO DIURNO (m/seg)					
	0 a 2		2 a 5		> 5	
	A	B	A	B	A	B
< 20	-2.350	1.650	-2.150	1.850	-1.950	2.05
20 - 50	-2.050	1.450	-1.925	1.575	-1.875	1.725
> 50	-1.600	1.100	-1.900	1.275	-1.800	1.350

Fuente: FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER 1977 (ROMA).

Cuadro C 8: Radiación extraterrestre (Ra) expresada en equivalente de evaporación en mm/día.

LAT.	HEMISFERIO SUR											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICCIEMBRE
40	17.9	15.7	12.5	9.2	6.6	5.3	5.9	7.9	11.0	14.2	16.9	18.3
38	17.9	15.8	12.8	9.6	7.1	5.8	6.3	8.3	11.4	14.4	17.0	18.3
36	17.9	16.0	13.2	10.1	7.5	6.3	6.8	8.6	11.7	14.6	17.0	18.2
34	17.8	16.1	13.5	10.5	8.0	6.8	7.2	9.2	12.0	14.9	17.1	18.2
32	17.8	16.2	13.8	10.9	8.5	7.3	7.7	9.6	12.4	15.1	17.2	18.1
30	17.8	16.4	14.0	11.3	8.9	7.8	8.1	10.1	12.7	15.3	17.3	18.1
28	17.7	16.4	14.3	11.6	9.3	8.2	8.6	10.4	13.0	15.4	17.2	17.9
26	17.6	16.4	14.4	12.0	9.7	8.7	9.1	10.9	13.2	15.5	17.2	17.8
24	17.5	16.5	14.6	12.3	10.2	9.1	9.5	11.2	13.4	15.6	17.1	17.7
22	17.4	16.5	14.8	12.6	10.6	9.6	10.0	11.6	13.7	15.7	17.0	17.5
20	17.3	16.5	15.0	13.0	11.0	10.0	10.4	12.0	13.9	15.8	17.0	17.4
18	17.1	16.5	15.1	13.2	11.4	10.4	10.8	12.3	14.1	15.8	16.8	17.1
16	16.9	16.4	15.2	13.5	11.7	10.8	11.2	12.6	14.3	15.8	16.7	16.8
14	15.7	16.4	15.3	13.7	12.1	11.2	11.6	12.9	14.5	15.8	16.5	16.6
12	16.6	16.3	15.4	14.0	12.5	11.6	12.0	13.2	14.7	15.8	16.4	16.5
10	16.4	16.3	15.5	14.2	12.8	12.0	12.4	13.5	14.8	15.9	16.2	16.2
8	16.1	16.1	15.5	14.4	13.1	12.4	12.7	13.7	14.9	15.8	16.0	16.0
6	15.8	16.0	15.6	14.7	13.4	12.8	13.1	14.0	15.0	15.7	15.8	15.7
4	15.5	15.8	15.6	14.9	13.8	13.2	13.4	14.3	15.1	15.6	15.5	15.4
2	15.3	15.7	15.7	15.1	14.1	13.5	13.7	14.5	15.2	15.5	15.3	15.1
0	15.0	15.5	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8

Fuente: FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER 1977 (ROMA).

Cuadro C 9: Valores del factor de ponderación (w) para los efectos de la radiación sobre ETP a diferentes temperaturas y altitudes

ALTITUD (m)	TEMPERATURA (°C)																			
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
0	0.43	0.46	0.49	0.52	0.55	0.58	0.61	0.64	0.66	0.68	0.71	0.73	0.75	0.77	0.78	0.8	0.82	0.83	0.84	0.85
500	0.45	0.48	0.51	0.54	0.57	0.6	0.62	0.65	0.67	0.70	0.72	0.74	0.76	0.78	0.79	0.81	0.82	0.84	0.85	0.86
1000	0.46	0.49	0.52	0.55	0.58	0.61	0.64	0.66	0.69	0.71	0.73	0.75	0.77	0.79	0.8	0.82	0.83	0.85	0.86	0.87
2000	0.49	0.52	0.55	0.58	0.61	0.64	0.66	0.69	0.71	0.73	0.75	0.77	0.79	0.81	0.82	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88
3000	0.52	0.55	0.58	0.61	0.64	0.66	0.69	0.71	0.73	0.75	0.77	0.79	0.81	0.82	0.84	0.85	0.86	0.88	0.88	0.89
4000	0.55	0.58	0.61	0.64	0.66	0.69	0.71	0.73	0.76	0.78	0.79	0.81	0.83	0.84	0.85	0.86	0.88	0.89	0.9	0.90

Fuente: FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER 1977 (ROMA).

Cuadro C 10: Constantes A y B para estimar la evapotranspiración potencial en función de la HR y la velocidad del viento

INTERVALO DE HR (%)	CATEGORÍA DE VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO DIURNO (m/s)							
	> 8 m/s		05-ago		02-may		0 - 2	
	a	b	a	b	a	b	a	b
ALTO > 70	-0.486	0.970	-0.410	0.923	-0.403	0.876	-0.350	0.829
ALTO - MEDIO 55 - 77%	-0.410	1.086	-0.300	1.204	-0.306	0.962	-0.480	0.912
BAJO - MEDIO 55 - 40 %	-0.120	1.192	-0.180	1.112	-0.28	1.048	-0.540	1.004

Fuente: FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER 1977 (ROMA).

Cuadro C 11: Factor de evapotranspiración potencial (Mf) En mm/día.

LATITUD SUR	MESES											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICCIEMBRE
1	2.788	2.117	2.354	2.197	2.137	1.990	2.091	2.216	2.256	2.358	2.234	2.265
2	2.371	2.136	2.357	2.182	2.108	1.956	2.05	2.194	2.251	2.372	2.263	2.301
3	2.353	2.154	2.360	1.167	2.079	1.922	2.026	2.172	2.246	2.386	2.29	2.337
4	2.305	2.172	2.362	2.151	2.050	1.888	1.995	2.15	2.240	2.398	2.318	2.372
5	2.416	2.189	2.363	2.134	2.020	1.854	1.96	2.126	2.234	2.411	2.345	2.407
6	2.447	2.05	2.363	2.117	1.980	1.820	1.975	2.103	2.226	2.422	2.371	2.442
7	2.478	2.221	2.363	2.099	1.959	1.785	1.893	2.078	2.218	2.233	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	2.51
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	2.266	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	1.976	2.180	2.47	2.497	2.61
12	2.625	2.292	2.350	2.002	1.799	1.608	1.719	1.950	2.169	2.477	2.52	2.643
13	2.652	2.905	2.345	1.981	1.767	1.572	1.684	1.922	2.157	2.464	2.543	2.675
14	2.680	2.317	2.340	1.959	1.733	1.536	1.648	1.895	2.144	2.490	2.566	2.706
15	2.707	2.326	2.334	2.937	1700	1.5	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	2.769
18	2.785	2.359	2.311	1.867	2.588	1.391	1.504	1.78	2.068	2.508	2.651	2.830
19	2.811	2.360	2.302	1.843	1.564	1.354	1.467	1.75	2.072	2.51	2.671	2.859

Fuente: FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER 1977 (ROMA).

ANEXO D

Evapotranspiración Empleando Fórmulas

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial empleando fórmulas presentadas en la revisión bibliográfica, se empleó los datos de los factores climáticos que se presentan en el Anexo C y en los cuadros C 5 a C 15. El ejemplo del procedimiento para el cálculo de la evapotranspiración potencial se presenta a continuación:

El presente ejemplo se refiere al mes de Mayo, los datos se reemplazaran en las formulas presentadas en la revisión bibliográfica

1. BLANEY – CRIDDLE.

$$f = p * [0.46 * T_m + 8.13]$$

$$f = 0.26 * [0.46 * 14.3 + 8.13] = 3.82 \text{ mm/día.}$$

$$ETP = A + B * f$$

$$ETP = -1.733 + 1.033 * 3.82 = 2.21 \text{ mm/día.}$$

2. RADIACIÓN.

$$ETP = a + b * w * R_s$$

$$ETP = -0.350 + 0.829 * 0.69 * 7.50 = 3.9 \text{ mm/día.}$$

3. HARGREAVES CON TEMPERATURA.

$$ETP = MF * T^{\circ}F * CE * CH$$

$$ETP = 1.90 * 83.34 * 1.06 * 0.88 = 4.8$$

4. HARGREAVES CON RADIACIÓN.

$$ETP = 0.0075 * R_s * T^{\circ}F$$

$$ETP = 0.0075 * 7.50 * 83.34 = 4.7 \text{ mm/día.}$$

5. TURC.

$$\mathbf{ETP = K1 * K2 * (Rsc + 50) * \frac{TC}{(TC+15)}}$$

$$\mathbf{ETP = 0.40 * 1.0 * \frac{1}{31} * (752.94 + 50) * \frac{14.3}{(14.3+15)} = 5.1 \text{ mm/día.}}$$

6. THORNTHWAITE.

$$\mathbf{ETP = 1.6 \left(\frac{L_1}{12}\right) \left(\frac{N}{30}\right) \left(\frac{10 * T}{I}\right)^{a_1}}$$

$$\mathbf{ETP = 1.6 \left(\frac{11.60}{12}\right) \left(\frac{31}{30}\right) \left(\frac{10*14.3}{58.57}\right)^{1.41} = 5.6 \text{ mm/día}}$$

7. JENSEN HAISE.

$$\mathbf{ETP = Rs (0.025 * Tm + 0.08)}$$

$$\mathbf{ETP = 7.50 (0.025 * 14.3 + 0.08) = 3.3 \text{ mm/día.}}$$

ANEXO E

CURVAS DE HUMEDAD DETERMINADAS PARA EL AREA EXPERIMENTAL.

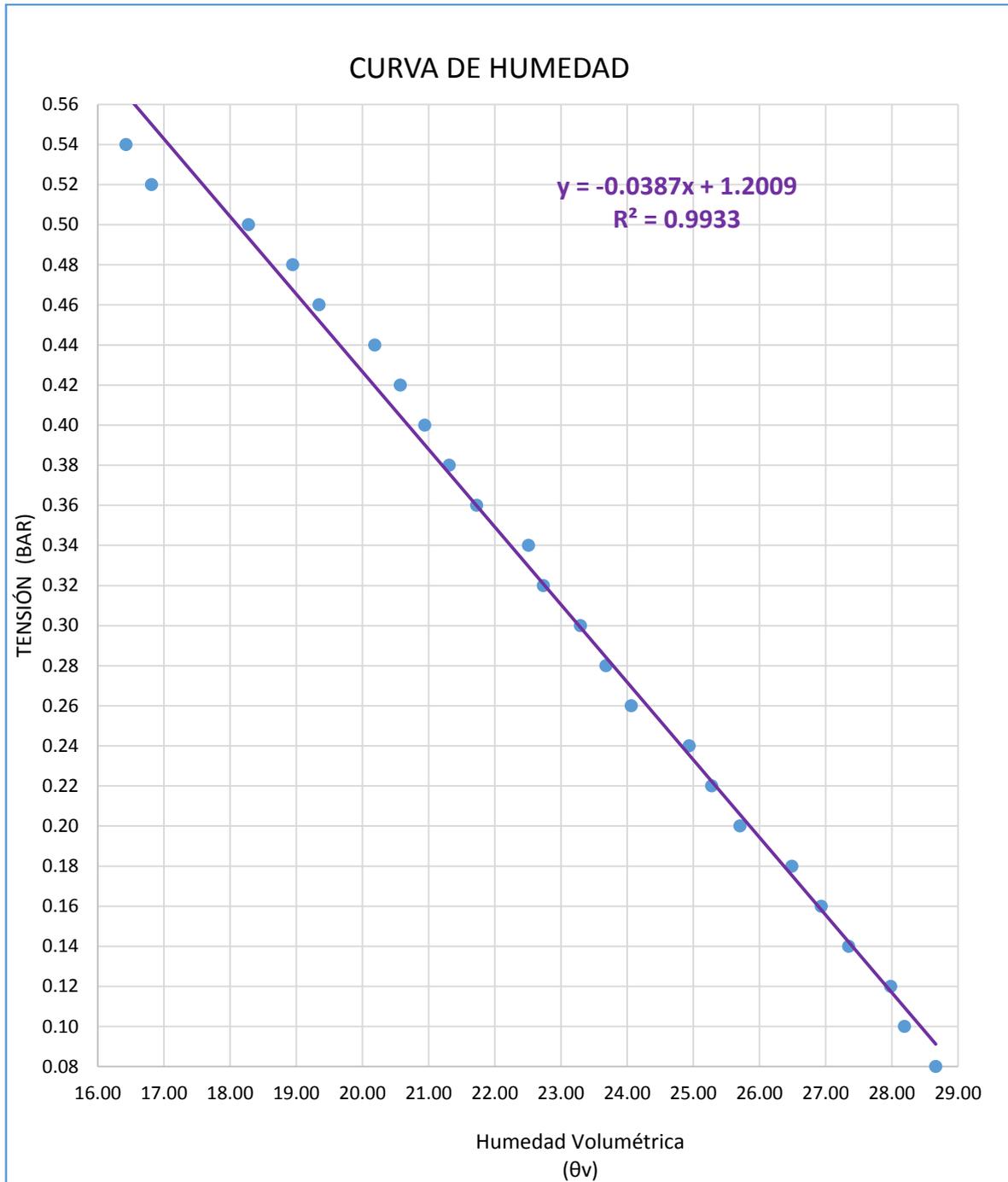
Como se mencionó anteriormente, los tensiómetros son instrumentos que permiten obtener directamente el contenido de humedad del suelo puesto que miden la tensión o energía a la que el agua está retenida por las partículas del suelo y no la humedad directa.

Para obtener el contenido de humedad del suelo en la zona no saturada mediante los tensiómetros se hace necesario de una relación entre la tensión de succión del suelo o potencial matricial y su contenido de humedad, la cual puede ser obtenida mediante la confección de una curva de retención de agua.

Para una profundidad de 15 cm.

HUMEDAD GRAVIÉTRICA	TENSIÓN(cb)
19.37	8
19.05	10
18.91	12
18.48	14
18.20	16
17.90	18
17.37	20
17.08	22
16.85	24
16.26	26
16.00	28
15.74	30
15.36	32
15.21	34
14.68	36
14.40	38
14.15	40
13.90	42
13.64	44
13.07	46
12.80	48
12.35	50
11.36	52
11.10	54

HUMEDAD VOLUMÉTRICA	TENSIÓN (BAR)
28.67	0.08
28.19	0.10
27.99	0.12
27.35	0.14
26.94	0.16
26.49	0.18
25.71	0.20
25.28	0.22
24.94	0.24
24.06	0.26
23.68	0.28
23.30	0.30
22.73	0.32
22.51	0.34
21.73	0.36
21.31	0.38
20.94	0.40
20.57	0.42
20.19	0.44
19.34	0.46
18.94	0.48
18.28	0.50
16.81	0.52
16.43	0.54



Fuente: Elaboración Propia.

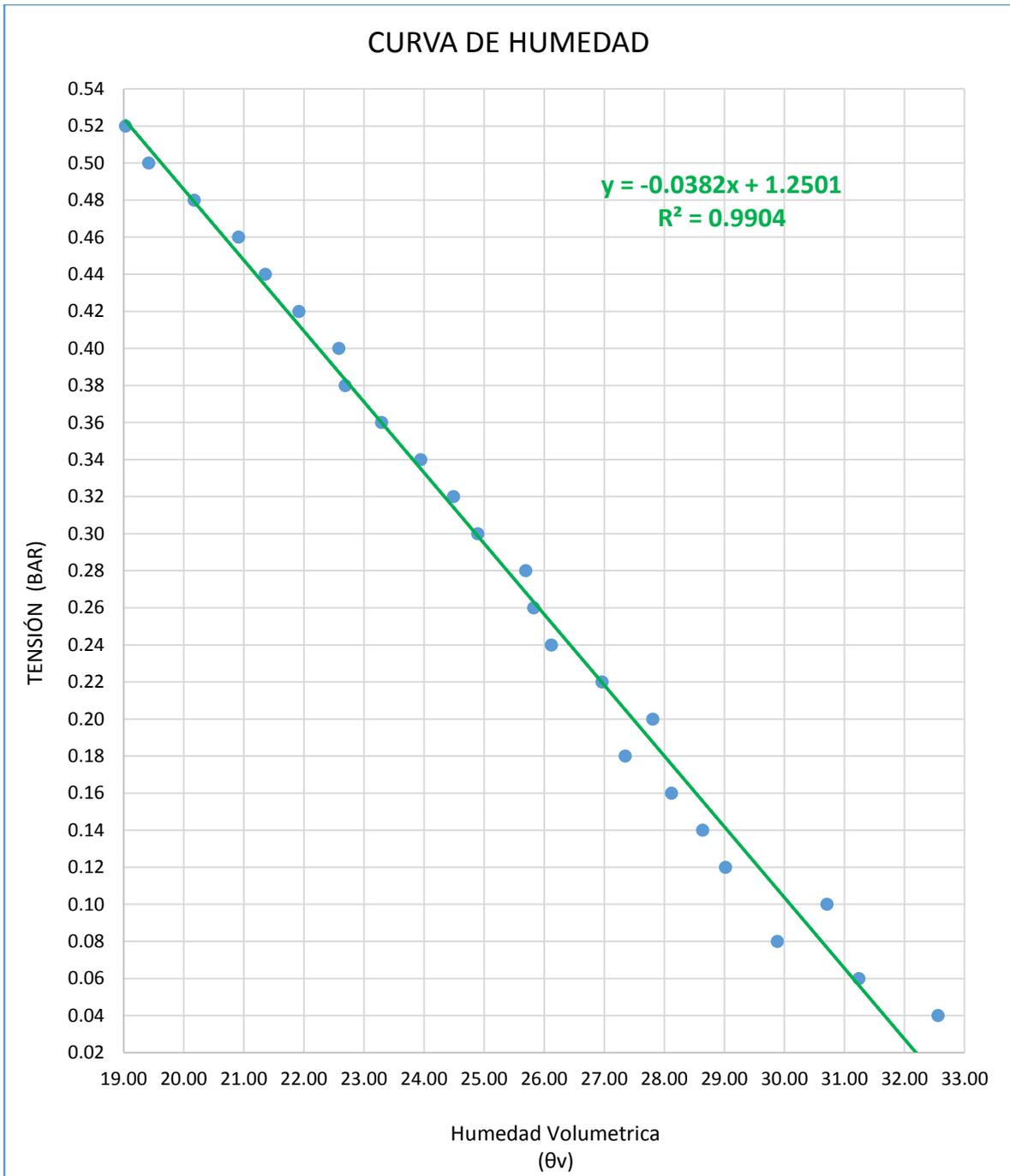
Para una profundidad de 30 cm.

HUMEDAD GRAVIÉTRICA	TENSIÓN(cb)
22.00	4
21.11	6
20.19	8
20.75	10
19.61	12
19.35	14
19.00	16
18.48	18
18.79	20
18.22	22
17.65	24
17.45	26
17.36	28
16.82	30
16.55	32
16.18	34
15.74	36
15.33	38
15.26	40
14.81	42
14.43	44
14.13	46
13.63	48
13.12	50
12.86	52

C.C

HUMEDAD VOLUMÉTRICA	TENSIÓN (BAR)
32.56	0.04
31.24	0.06
29.88	0.08
30.71	0.10
29.02	0.12
28.64	0.14
28.12	0.16
27.35	0.18
27.81	0.20
26.97	0.22
26.12	0.24
25.83	0.26
25.69	0.28
24.89	0.30
24.49	0.32
23.95	0.34
23.30	0.36
22.69	0.38
22.58	0.40
21.92	0.42
21.36	0.44
20.91	0.46
20.17	0.48
19.42	0.50
19.03	0.52

Fuente: Elaboración Propia.



Fuente: Elaboración Propia.

ANEXO F**PANEL FOTOGRÁFICO DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS.****PLUVIÓMETRO****TENSIÓMETRO MODELO "R"****ESTACIÓN METEOROLÓGICA SANTIAGO ANTUNES DE MAYOLO – SENAMHI.**

ANEXO G

PANEL FOTOGRÁFICO DE LA INSTALACIÓN DE LOS LISÍMETROS.





ANEXO H

PANEL FOTOGRÁFICO DE LA INSTALACIÓN DE LOS TENSIÓMETROS.



Acondicionamiento del suelo



Llenado del tensiómetro.



Colocación en el suelo de los lisímetros.



Extracción del aire con la bomba de vacío.



Tensiómetro ya instalado y marcando cero.

ANEXO I**PANEL FOTOGRÁFICO DE LA CONDUCCIÓN DEL CULTIVO DE QUINUA Y RYE GRASS.****Cultivo del Rye Grass****Siembra del rye grass****Riego de saturación.****A un mes de la siembra****A dos meses de la siembra**

Cultivo de Quinua var. Salcedo INIA

Preparación del Terreno



Abonamiento



Siembra de la Quinua var salcedo INIA



Etapa Inicial (Mayo)

Emergencia



Dos hojas verdaderas



Cuatro hojas verdaderas.



Etapa de Desarrollo (Junio y Julio)

Seis hojas verdaderas



Ramificación



Inicio de Panojamiento



Etapa de Medios (Agosto y Setiembre)

Panojamiento



Floración



Etapa Final (Octubre)

Llenado de Granos Lechosos.



Granos Pastosos



Madurez Fisiológica.



Cosecha



ANEXO J

CÁLCULOS

- Para una profundidad a 15 cm.

Capacidad de campo = 28.67%

Punto de Marchitez Permanente = 15%

$n = 0.30$ (para el cultivo de quinua)

Lectura = $n * (C.C - P.M.P)$

Lectura = $0.30 * (28.67\% - 15\%)$

Lectura = 4.10%

Lectura = $(28.67\% - 4.10\%)$

Lectura = 24.57% de humedad.

Por lo tanto cuando $H^o = 24.57\%$ —————> **Tensión = 22 cb.**

- Para determinar la Lámina aplicada (La)

$La = (15 \text{ cm} * 1.48 \text{ gr/cm}^3) / \text{gr/cm}^3 * (4.10\%/100)$

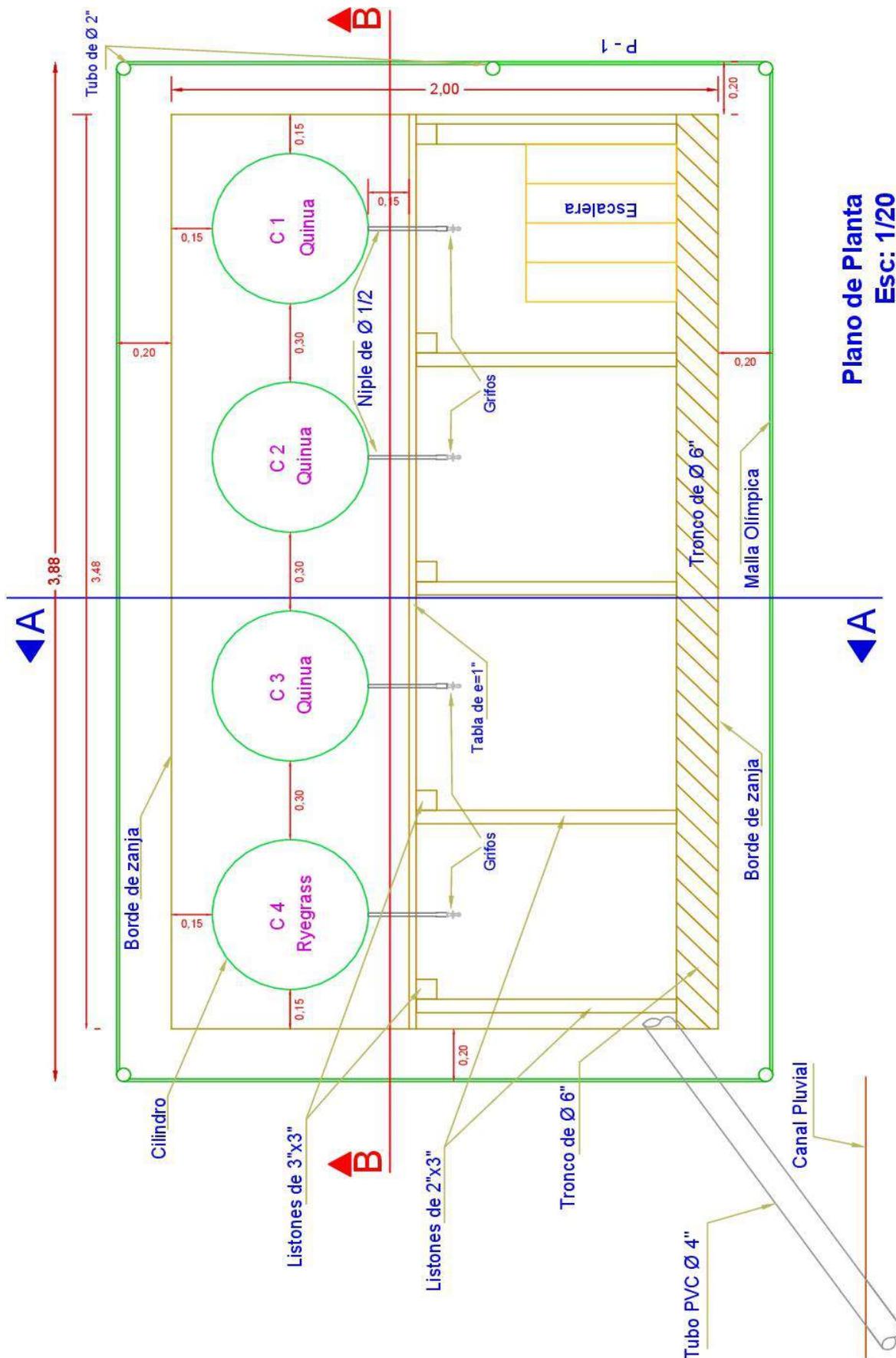
$La = 0.91 \text{ cm}$

$Va = \text{Área} * La$

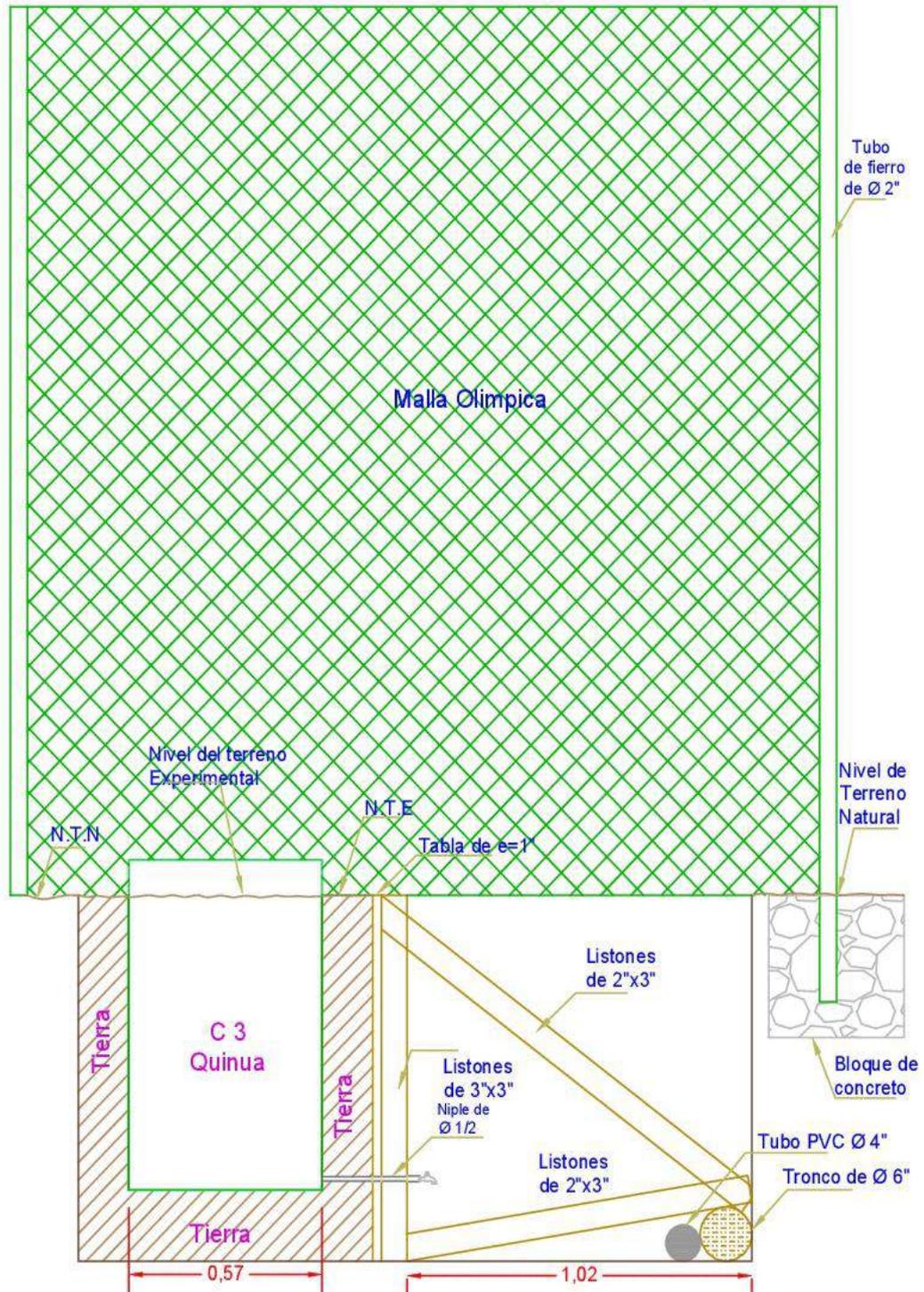
$Va = 2.552 * 0.91 \text{ cm}$

$Va = 2,322\text{cm}^3$ —————> **$Va = 2500 \text{ ml} = 2.5 \text{ ltrs.}$**

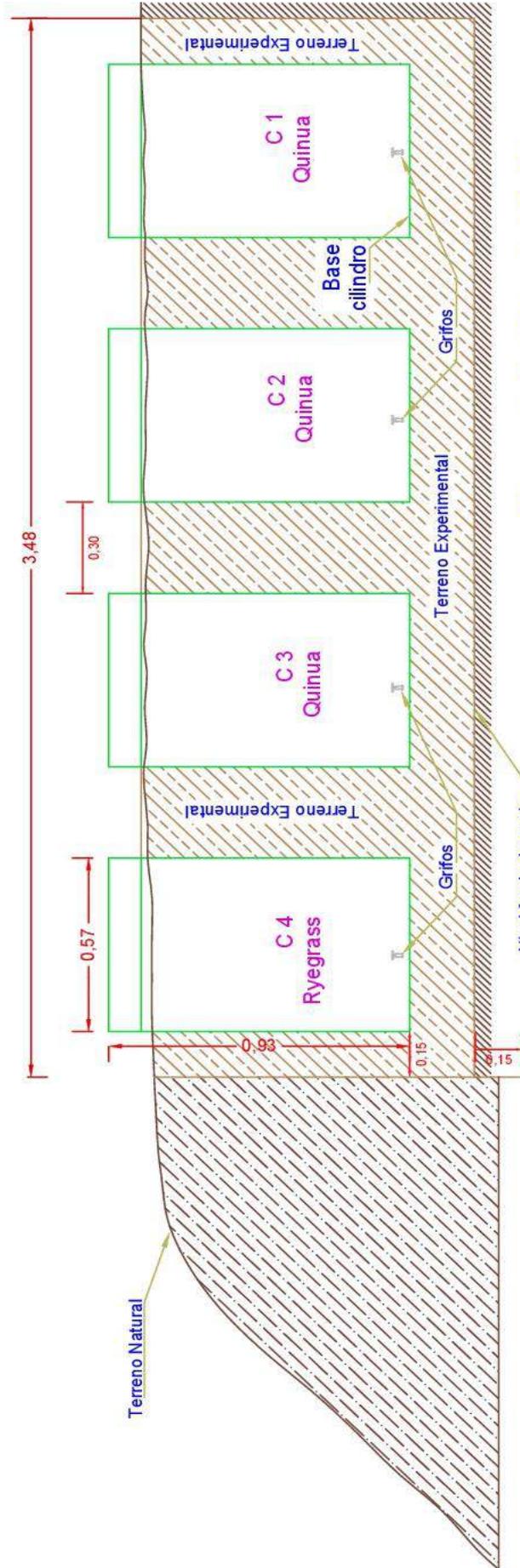
ANEXO I
PLANOS



Plano de Planta
Esc: 1/20



Plano de Perfil corte A -A
Esc: 1/20



Plano de Perfil corte B - B
Esc: 1/20