

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**“DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CULTIVO ( $K_c$ ) DE  
LA PAPA (*Solanum tuberosum*) VARIEDAD UNICA UTILIZANDO  
LISÍMETRO DE DRENAJE EN LA MOLINA”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÍCOLA**

**CARLOS ZAMATA QUISPE**

**Lima – Perú**

**2019**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**“DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CULTIVO (KC) DE LA  
PAPA (SOLANUM TUBEROSUM) VARIEDAD UNICA UTILIZANDO  
LISÍMETRO DE DRENAJE, EN LA MOLINA”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

**INGENIERO AGRÍCOLA**

Presentado por:

**BACH. CARLOS ZAMATA QUISPE**

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Dr. ABSALÓN VÁSQUEZ VILLANUEVA

Presidente

Mg. Sc. MIGUEL ÁNGEL SÁNCHEZ DELGADO

Asesor

Mg.Sc. ROLANDO PERCY EGÚSQUIZA BAYONA

Miembro

Mg. Sc. LUIS RAMÓN RÁZURI RAMÍREZ

Miembro

Dr. JESÚS ABEL MEJÍA MARCACUZCO

Co-ASESOR

LIMA – PERÚ

2019

## **DEDICATORIA**

*Dedico este proyecto a mi madre Luisa Quispe por brindarme siempre su apoyo incondicional, por ser padre y madre, y por ser la mejor mujer del mundo. Esta tesis es un logro más que llevo a cabo y sin lugar a duda ha sido en parte gracias a ti.*

**TE AMO MAMÁ.**

## **AGRADECIMIENTO**

*A la Universidad Nacional Agraria La Molina por permitir lograr un sueño de infancia, Ser alumno y profesional de esta institución; también a la Facultad de Ingeniería Agrícola por la formación brindada a través de sus buenos MAESTROS.*

*A mis hermanos Jorge Cruz, Martín Cruz y demás familiares por el apoyo incondicional y la paciencia brindada en este proceso.*

*A mis colegas en el trabajo de investigación del cultivo de la papa única (Piero Natividad, Raúl López y Frank Oviedo), por el apoyo a tiempo completo y continuo en los trabajos de campo que se hicieron durante la investigación.*

*A mi asesor, Mg. Sc. Miguel Sánchez, por su comprensión, apoyo y las pautas brindadas durante el desarrollo y redacción del presente trabajo.*

*A mi compañera Gladys Pariona por su apoyo incondicional en las labores rutinarias para desarrollar el trabajo de campo en el estudio, además del apoyo emocional brindado en todo momento.*

*A mis amigos de toda la vida; Jhon Merino, Hency Riquez, Abel Flores, Lenin Mendoza por ser las mejores personas que he conocido, inigualables.*

## ÍNDICE GENERAL

### RESUMEN

### ABSTRACT

Pág.

<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Justificación .....	2
1.2 Objetivos de la investigación .....	3
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>4</b>
2.1 Marco conceptual de la papa .....	4
2.1.1 La papa variedad UNICA .....	4
2.1.2 Crecimiento, desarrollo y tuberización .....	5
2.1.3 Suelo y clima .....	6
2.1.4 Demanda general de agua (pre-investigación).....	6
2.2 Importancia del agua en el suelo.....	7
2.2.1 El agua en el suelo .....	7
2.2.2 Medición del agua en el suelo.....	9
2.3 Evapotranspiración .....	10
2.3.1 Evaporación .....	11
2.3.2 Transpiración .....	12
2.3.3 Factores que influyen la evapotranspiración .....	13
2.4 Evapotranspiración de cultivo de referencia (ETo) .....	14
2.3.1 Método del tanque de evaporación.....	14
2.3.2 Datos meteorológicos.....	17

2.2.4	Métodos de Penman – Monteith .....	19
2.5	Evapotranspiración de cultivo real (ETc) .....	20
2.4.1	Balance hídrico .....	21
2.4.2	Lisímetros .....	23
2.6	Coefficiente de cultivo (Kc).....	23
<b>III.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>26</b>
3.1	Localización del campo experimental .....	26
3.2	Características del área de estudio .....	28
3.2.1	Características climáticas.....	28
3.2.2	Características del suelo.....	28
3.2.3	Características del Agua .....	29
3.3	Materiales y equipos .....	29
3.3.1	Materiales en la preparación del terreno.....	29
3.3.2	Materiales en la instalación del sistema de riego.....	30
3.3.3	Materiales para la construcción del lisímetro .....	30
3.3.4	Material vegetal .....	31
3.3.5	Equipos para monitoreo de la evapotranspiración.....	31
3.3.6	Materiales y equipos para la medición de la humedad en el suelo .....	32
3.4	Metodología de la investigación .....	32
3.4.1	Preparación del terreno .....	32
3.4.2	Caracterización del agua y suelo.....	33
3.4.3	Sistema de riego.....	34
3.4.4	Diseño, construcción e instalación del lisímetro.....	35
3.4.5	Instalación y desarrollo del cultivo a investigar .....	39
3.4.5.1	siembra en el lisímetro.....	39
3.4.5.2	parametros biométricos.....	40

3.4.5.3 rendimientos y sus componentes .....	40
3.4.6    Monitoreo de la humedad en el suelo .....	41
3.4.7    Medición de la evapotranspiración de referencia .....	43
3.4.8    Balance hídrico en el suelo .....	45
3.4.9    Coeficiente de cultivo .....	46
<b>IV. RESULTADOS.....</b>	<b>48</b>
4.1    Características de agua y suelo .....	48
4.1.1    Análisis de agua .....	48
4.1.2    Características físicas del suelo .....	48
4.2    Condiciones ambientales .....	50
4.3    Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET <sub>o</sub> ) .....	53
4.4    Balance hídrico .....	55
4.4.1    Riego .....	55
4.4.2    Precipitación .....	56
4.4.3    Agua drenada .....	57
4.4.4    Variedad de humedad en el suelo .....	57
4.5    Evapotranspiración del cultivo real (ET <sub>c</sub> ) .....	58
4.6    Determinación del coeficiente de cultivo (K <sub>c</sub> ) .....	60
4.7    Otros resultados .....	64
4.7.1    Parámetros biométricos.....	64
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>67</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>69</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>70</b>
<b>VIII. ANEXOS .....</b>	<b>74</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores de capacidad de campo para diferentes suelos.....	8
Tabla 2: Valores de punto de marchitez para diferentes suelos .....	9
Tabla 3: Coeficientes del tanque evaporímetro (Kp) para el tanque Clase A .....	16
Tabla 4: Datos climáticos de la Estación Davis 2017 UNALM.....	28
Tabla 5: Análisis de suelo - caracterización .....	28
Tabla 6: Características hídricas del suelo .....	28
Tabla 7: Análisis de agua.....	29
Tabla 8: Materiales para la preparación del terreno .....	29
Tabla 9: Materiales usados en el sistema de riego.....	30
Tabla 10: Materiales usados para la construcción en la zona del lisímetro.....	30
Tabla 11: Materiales usados para la construcción en la zona de descarga .....	31
Tabla 12: Equipos para el monitoreo de la evapotranspiración.....	32
Tabla 13: Materiales y equipos para la medición de la humedad en el suelo.....	32
Tabla 14: Descripción de calibres o diámetros de tubérculos de papa.....	41
Tabla 15: Resumen de la evapotranspiración promedio para diferentes métodos .....	53
Tabla 16: Datos requeridos para la determinación del C.U.....	55
Tabla 17: Volumen de agua aplicado al lisímetro .....	56
Tabla 18: Resultados semanales de la Evapotranspiración del cultivo de papa.....	59
Tabla 19: Coeficiente del cultivo (Kc) de la papa por fases fenológicas .....	60
Tabla 20: Número de tallos principales en el cultivo .....	64



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estabilidad de la variedad unica frente a otras variedades.....	5
Figura 2: Periodo vegetativo de la papa, variedad Unica .....	5
Figura 3: Definición de la evapotranspiración .....	11
Figura 4: Factores que afectan la evapotranspiración .....	13
Figura 5: Evapotranspiración de cultivo de referencia.....	14
Figura 6: Características del tanque evaporímetro tipo A .....	15
Figura 7: Características del cultivo de referencia .....	19
Figura 8: Balance de agua en el suelo de la zona radicular .....	22
Figura 9: Curva generalizada del coeficiente de cultivo .....	25
Figura 10: Ubicación del área demostrativa .....	26
Figura 11: Ubicación del área de estudio dentro del área demostrativa.....	27
Figura 12: Sistema de riego en la parcela 4.....	34
Figura 13: Esquema del lisímetro de drenaje .....	35
Figura 14: Tanque utilizado para la construcción del lisímetro .....	36
Figura 15: Uso de grava como material filtrante .....	37
Figura 16: Conexión del desfogue y alivio.....	38
Figura 17: Zona de recolección .....	39
Figura 18: Siembra en el lisímetro .....	40
Figura 19: Instalación del sensor Watermark .....	42
Figura 20: Medidor digital Watermark.....	43
Figura 21: Tanque evaporímetro tipo A .....	44
Figura 22: Estación Davis Vantage .....	45
Figura 23: Densidad aparente del suelo.....	49
Figura 24: Contenido de humedad en el suelo .....	49
Figura 25: Registro de la temperatura durante la investigación .....	51
Figura 26: Registro de la humedad relativa durante la investigación.....	51
Figura 27: Registro de la radiación solar durante la investigación.....	52
Figura 28: Registro de la velocidad del viento corregida a 2m. de altura .....	53

Figura 29: Evapotranspiración de referencia mediante tres métodos.....	54
Figura 30: Curva de calibración del sensor Watermark y Tensiómetro .....	58
Figura 31: Variación del coeficiente de cultivo de la papa .....	61
Figura 32: Curva de coeficiente de cultivo según la metodología FAO .....	62
Figura 33: Comparación Kc fao con Kc determinado en la investigación.....	63
Figura 34: Altura de planta en el Lisímetro.....	64
Figura 35: Numero de tubérculos por planta .....	65
Figura 36: Peso del tubérculo por planta .....	65

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Materiales usados en la construcción del lisímetro .....	74
Anexo 2: Preparación del terreno (fotos) .....	77
Anexo 3: Diseño del lisímetro (vista en planta) .....	79
Anexo 4: Construcción e instalación del lisímetro .....	81
Anexo 5: Análisis de agua .....	83
Anexo 6: Análisis físico – químico del suelo .....	84
Anexo 7: Características hídricas del suelo .....	85
Anexo 8: Determinación del coeficiente de uniformidad.....	87
Anexo 9: Variación de humedad en el suelo mediante instrumentos de medición (calibración).....	88
Anexo 10: Variables registradas para la obtención del kc.....	89
Anexo 11: Coeficiente de cultivo (comparación).....	93
Anexo 12: Parámetros biométricos (comparación) .....	94

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

### Acrónimo

ANA	Autoridad Nacional del Agua
CC	Capacidad de campo
CE	Conductividad eléctrica
CIP	Centro Internacional de la Papa
CU	Coefficiente de Uniformidad
ETc	Evapotranspiración de Cultivo Real
ETo	Evapotranspiración de referencia
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FIA	Facultad de Ingeniería Agrícola
Kc	Coefficiente de cultivo
MINAGRI	Ministerio de Agricultura y Riego
pH	Potencial de hidrógeno
PMP	Punto de Marchitez Permanente
SAR	Relación de absorción de sodio
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología
UNALM	Universidad Nacional Agraria La Molina

## RESUMEN

La papa representa el principal cultivo del país, en superficie sembrada además el Perú cuenta con la mayor diversidad de este tubérculo. Actualmente tenemos cerca de 2,400 variedades. La papa variedad unica fue desarrollada por el centro internacional de la papa (CIP) y liberada en el año 1998, en la actualidad es muy requerida encontrándose en todos los mercados. Debido a lo trascendental de este cultivo en el escenario agrícola es de mucha importancia determinar el requerimiento hídrico de la papa; utilizando para ello un lisímetro de drenaje. El objetivo principal de esta investigación tuvo como finalidad determinar el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) de la papa variedad unica, utilizando el lisímetro de drenaje. El trabajo de campo se realizó en la parcela demostrativa del Departamento de Recursos Hídricos (DRH) de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional Agraria La Molina, durante los meses de junio a setiembre del 2017. Para ello se diseñó y construyó un lisímetro de drenaje de 1.2 m<sup>2</sup> de área total y cumplió con los parámetros de precisión, confiabilidad y economía. En el lisímetro se realizó la siembra y evaluación de cuatro plantas y estuvo dentro de un área total de 360 m<sup>2</sup>, en la cual también se realizó a la par la siembra de papa variedad unica. El uso del tanque evaporímetro tipo A fue necesario para obtener la lámina de riego a reponer, la evapotranspiración del cultivo de referencia ( $E_{To}$ ). La  $E_{To}$  también se obtuvo a partir de la estación meteorológica Davis ventage. Luego, para la obtención de la evapotranspiración del cultivo ( $E_{Tc}$ ) se realizó el balance hídrico en el suelo y las variables que intervinieron en dichos balances fueron las siguientes: riego, precipitación, variación de humedad en el suelo y agua drenada. Finalmente, la determinación del coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) se obtuvo relacionando la  $E_{Tc}$  entre la  $E_{To}$  teniendo como resultado un  $K_c$  promedio de 0.8 evaluado desde el mes de junio hasta el mes de setiembre.

*Palabras claves: coeficiente de cultivo, lisímetro de drenaje, evapotranspiración de cultivo, papa variedad UNICA.*

## ABSTRACT

The potato represents the main crop in the country in terms of area planted, and Peru has the greatest diversity of this tuber. Currently we have about 2400 varieties. The unique variety of potato was developed by the International Potato Center (CIP) and released in 1998 and is currently in great demand in all markets. Due to the importance of this crop in the agricultural scenario is important to determine the water requirement of the potato, using a lysimeter drainage. The main objective of this research was to determine the crop coefficient ( $K_c$ ) of the single variety potato, using the drainage lysimeter. The field work was carried out in the demonstration plot of the Department of Water Resources (DRH) of the Faculty of Agricultural Engineering, at the National Agrarian University La Molina, during the months of June to September 2017. A drainage lysimeter of 1.2 m<sup>2</sup> of total area was designed and built to meet the parameters of accuracy, reliability and economy. In the lysimeter was made the planting and evaluation of four plants and was within a total area of 360m<sup>2</sup>, which was also made at the same time the planting of potato single variety. The use of the evaporator tank type A was necessary to obtain the irrigation sheet to replace, the evapotranspiration of the reference crop ( $E_{To}$ ), the  $E_{To}$  was also obtained from the Davis Ventage weather station. Then, to obtain the crop evapotranspiration ( $E_{Tc}$ ), the water balance in the soil was made and the variables that intervened in the balances were the following: irrigation, precipitation, variation of humidity in the soil and drainage water. Finally, the determination of the crop coefficient ( $K_c$ ) was obtained relating the  $E_{Tc}$  between the  $E_{To}$  having as result an average  $K_c$  of 0.8, evaluated from June to September.

**Keywords:** *crop coefficient, drainage lysimeter, crop evapotranspiration, UNICA variety potato*

## I. INTRODUCCIÓN

En el Perú la agricultura es el sistema de producción que mayor demanda de agua tiene, ya que consume el 80% de este recurso, según el ANA (2017). Por otra parte, la región costera es la zona que presenta mayor requerimiento hídrico teniendo como concentración poblacional el 60% y a su vez, donde se presenta la mayor producción agrícola a pesar de que solo presenta una disponibilidad de agua del 2.2%.

El cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) en la costa peruana representa solo un 5% del total nacional de siembras (MINAGRI, 2009). La variedad UNICA presenta una capacidad de adaptación a las condiciones agroecológicas de la costa; atributos de resistencia y precocidad que la hacen atractiva para los agricultores involucrados en el cultivo de papa.

Es de necesidad determinar el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), parámetro importante para el manejo, planificación y programación del riego, teniendo en consideración el periodo de crecimiento de la planta. Debido a que el requerimiento del agua varía de un periodo a otro y en determinado lugar. Por tanto, esta investigación busca determinar el requerimiento hídrico idóneo del cultivo teniendo en cuenta factores climáticos, suelo y tipo de cultivo;

## 1.1 Justificación

La papa es el cultivo más representativo del Perú, no sólo porque nuestro país es cuna de este tubérculo que ha salvado al mundo de hambrunas, sino porque actualmente es uno de los cultivos más extendidos en el agro peruano, siendo de mayor preferencia la región sierra. De acuerdo con el III Censo Nacional Agropecuario, alrededor de 600 mil productores del país destinan sus campos, total o parcialmente, al cultivo de la papa (MINAGRI, 2009). La variedad UNICA fue desarrollada por la División de Mejoramiento y Utilización de Recursos Genéticos del Centro Internacional de la Papa (CIP) con la colaboración de diferentes instituciones nacionales; entre ellos la Universidad San Luis Gonzaga de Ica.

Entre sus principales atributos destaca la tolerancia a temperaturas moderadamente altas, una gran estabilidad en diferentes épocas de siembra y en diferentes localidades; así como precocidad que la hace atractiva para los productores de papa. Por todo lo mencionado esta variedad representa una mejor opción frente a otras; cabe resaltar que esta variedad al ser relativamente nueva en el mercado es materia de investigación.

Es importante realizar estudios de determinación de coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) teniendo en consideración aspectos bajo los cuales se pretende producir (temperatura, tipo de suelo, entre otros), ya que el requerimiento de agua del cultivo es indispensable para que este realice todos sus procesos vitales. La determinación del  $K_c$  en las distintas etapas fenológicas del cultivo ayudará a mejorar la eficiencia en la incorporación de la necesidad hídrica del cultivo, debido a que proveen al cultivo solo la cantidad de agua necesaria, por lo que un exceso de agua de riego puede provocar entre otras cosas el lavado de los fertilizantes y el desperdicio del agua misma, mientras que una aportación de agua inferior a las necesidades de consumo del cultivo puede llegar a provocar déficit hídrico y con ello una reducción en la producción.

El uso del lisímetro nos permite obtener la evapotranspiración del cultivo, siendo el lisímetro de drenaje el más usado para esta investigación debido a que resulta ser más



económico y sencillo. Para la construcción del lisímetro de drenaje se debe tomar los siguientes factores: estabilidad, confiabilidad, sencillez y economía.

## **1.2 Objetivos de la investigación**

### **Objetivo General.**

Determinar el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) de la papa (*Solanum tuberosum*) variedad UNICA, utilizando lisímetro de drenaje.

### **Objetivos específicos.**

- a. Diseñar y construir un lisímetro de drenaje.
- b. Monitorear variables climáticas para la determinación de la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ).
- c. Realizar el balance hídrico en el suelo y determinar la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ )

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA.**

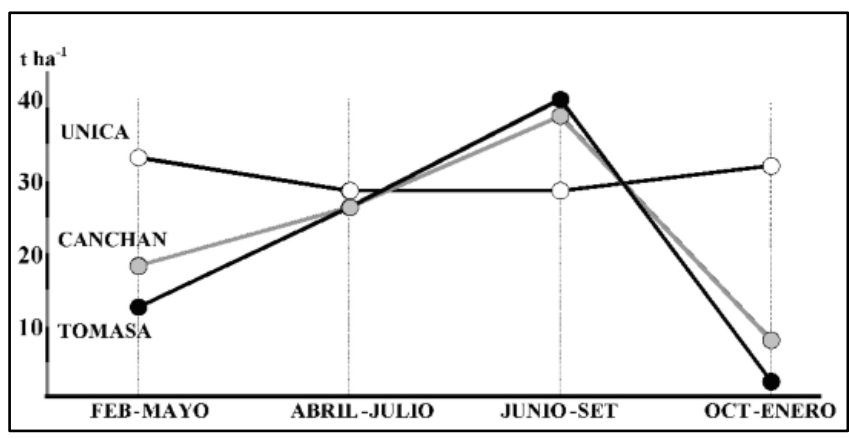
### **2.1 Marco conceptual de la papa**

#### **2.1.1 La papa variedad Unica**

La variedad UNICA fue seleccionada y evaluada por el Centro Internacional de la Papa (CIP) durante más de 7 años, sembrada en experimentos en más de 20 localidades; en el año 1998 fue liberada a los agricultores por la Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica y en el 2005 fue inscrita en el Registro Nacional de Cultivares con el registro N.º 0012.005-AG-SENASA-DGSV (Gutiérrez, 2007). Tiene como atributos la resistencia y precocidad que la hacen atractiva para los agricultores. La adaptación de la papa Unica a diferentes ambientes permite una amplia distribución geográfica tanto en regiones de la costa y sierra del Perú. Las buenas características para el consumo en fresco y para el procesamiento en tiras, representan una alternativa de mejores ingresos para los agricultores por la demanda que puede generar en el mercado (Gutiérrez; Espinoza y Bonierbale, 2007).

Por otra parte, esta variedad presenta las siguientes características es de porte bajo, follaje verde oscuro con tallos pigmentados, escasa floración, flores de color violáceo algo pálidas (de lejos parecen ser blancas), producen tubérculos de tamaño uniforme, de forma oblonga o alargada, color rojo claro, ojos superficiales, pulpa blanca marfil, brotes rojos violáceos (Egúsqüiza, 2014).

Presenta “Alto rendimiento potencial (50 t ha<sup>-1</sup>). Para el invierno en zonas de la costa peruana (trópico bajo) y en épocas húmedas de la zona sierra (trópico alto) se puede alcanzar el rendimiento potencial. En la primavera y en la época seca de las respectivas zonas se reduce el rendimiento. Comercialmente se pueden lograr rendimientos promedios de hasta 40 t ha<sup>-1</sup>” (Gutiérrez, 2007).



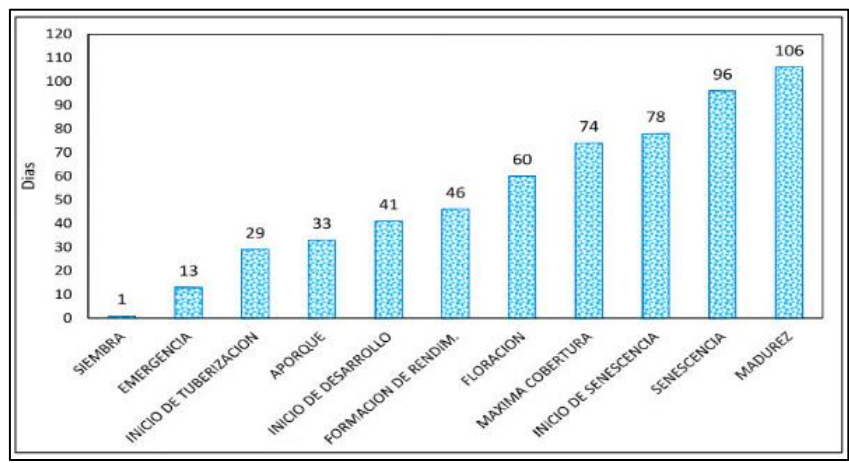
**Figura 1: Estabilidad de la variedad Unica frente a otras variedades**

FUENTE: Tomado de Gutiérrez-Rosales et al. 2007.

**2.1.2 Crecimiento, desarrollo y tuberización**

El conocimiento de la fenología de la planta de papa y de la asimilación de nutrientes durante el crecimiento y desarrollo, es de importancia clave para determinar los sistemas de fertilización.

La papa es un cultivo que requiere asimilar grandes cantidades de nutrientes en un breve período de tiempo, ya que su sistema radicular es fibroso, ramificado, poco desarrollado y superficial, lo que limita la intercepción radical de los nutrientes. Presenta un crecimiento acelerado de su follaje que se expande libremente y un período relativamente corto de engrosamiento de los tubérculos, como órgano de reserva (Gruner, 1982. Citado por Núñez, 2016). En la figura 2 se describe el periodo vegetativo de la papa variedad Unica.



**Figura 2: Periodo vegetativo de la papa, variedad Unica**

FUENTE: tomado de Ordoñez 2016

### **2.1.3 Suelo y clima**

La variedad Unica es una papa muy adaptable en suelos de la costa y sierra del Perú. Suelos que tranquilamente podrían presentar una conductividad eléctrica superior a los 2 dS/m; ósea suelos ligeramente salinos (Gutiérrez, 2007).

Es esencialmente un "cultivo de clima templado" cultivable en forma efectiva hasta los 3800msnm. Posee ligera tolerancia a temperaturas cálidas pudiendo tuberizar con temperaturas nocturnas de hasta 16 °C (Vásquez, 2003. citado por Gutiérrez, 2007). En cuanto a producción varía en función a temperaturas superiores a 10° C e inferiores a 30° C, mientras que la mejor producción ocurre donde la temperatura diaria se mantiene en promedio de 18° a 20° C.

### **2.1.4 Demanda general de agua (pre-investigación)**

Actualmente la demanda del agua de la variedad en estudio obedece a investigaciones anteriores de otras variedades similares a la Unica o investigaciones realizadas a diferentes condiciones climáticas.

Si bien es cierto aún no hay una investigación detallada y precisa del consumo del agua teniendo en cuenta las variables del clima y suelo donde se acentúa el cultivo, siendo de conocimiento que la papa es exigente en agua y muy sensible al déficit hídrico, puesto que demanda en promedio entre 5000-7000 m<sup>3</sup>/ha/campaña en costa (FAO, 2008. Citado por PSI, 2016), requiriendo (50 mm/semana) durante la formación de tubérculos. Pudiendo alcanzar los 13 mm/día durante el llenado de estos (130 metros cúbicos por hectárea día). Esto por supuesto, depende de la variedad, situación climática, textura del suelo, etc. (Rojas, sf). En condiciones de déficit hídrico, son afectados el rendimiento y la calidad de los tubérculos, además de otros parámetros, tales como el grado comercial, densidad, necrosis del centro, manchas, centro hueco y otros. El grado comercial es muy sensible a las deficiencias de manejo del riego. (Kafkafi y Tarchitzky, 2012.)

## **2.2 Importancia del agua en el suelo**

Es fundamental la eficiencia de aplicación del agua debido a que es un recurso escaso que generalmente no alcanza para regar toda la superficie que desea el agricultor o para no generar problemas en los sectores o predios que se encuentran en posiciones más bajas, la cantidad aprovechable de este elemento por el cultivo será variable y dependerá de los factores meteorológicos, del suelo y así como de la disponibilidad de agua de regadío. (INIA, 2013. Citado por León, 2016).

El contenido de humedad en el suelo es un factor importante para considerar, puesto que un terreno con demasiada humedad afectaría al tubérculo haciéndolo más acuoso y menos ricos en fécula, también incrementará su tamaño, pero tendrá menos cantidad de tubérculos. En suelos secos las ramificaciones del rizoma se alargan demasiado, el número de tubérculos aumenta, pero su tamaño se reduce considerablemente.

Por ello un incremento en los niveles de humedad de 20-80% incidirá en el crecimiento de los tallos, área foliar, peso seco y número de tubérculos. Riegos frecuentes al momento de la tuberización y una tensión de humedad de 40 kPa (0,4 bar) proporcionan rendimientos altos, gran cantidad de tubérculos, buen contenido de almidón. (Rojas, sf)

### **2.2.1 El agua en el suelo**

El suelo es un "reservorio" que contiene cierta cantidad de agua, de la cual sólo una parte está disponible para las plantas. Esta capacidad se encuentra limitada por el agua retenida entre los niveles de humedad denominados capacidad de campo (CC) y punto de marchites permanente (PMP) (Hurtado, 2002).

#### **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.).

### 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. (Vásquez et al., s.f.).

**Tabla 1: Valores de capacidad de campo para diferentes suelos**

Textura	Capacidad de campo %
Arenoso	8 – 10
Franco arenoso	14 – 17
Franco	17 – 20
Franco arcilloso	19 – 24
Arcilloso	27 – 35

FUENTE: Tomado de INIA, 2019.

### 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 (Palomino, 2009). Donde la planta no puede extraer agua fácilmente entrando a un proceso irreversible de marchitamiento permanente (Lazo, 2006). Para el cálculo del PMP se utilizó la siguiente relación propuesto por Silva en 1988:

$$\text{PMP} = \text{CC} * 0.74 - 5$$

Donde:

PMP : punto de marchitez en %

CC : capacidad de campo en %

**Tabla 2: Valores de punto de marchitez para diferentes suelos**

<b>Textura</b>	<b>P.M.P. %</b>
Arenoso	3 – 4,5
Franco arenoso	6,0 – 7,5
Franco	7,5 – 9,5
Franco arcilloso	9,5 – 11,0
Arcilloso	15,0 – 19,0

FUENTE: Tomado de INIA, 2019.

### **Precipitación efectiva (Pe)**

Vásquez y Chang (1992), mencionan que durante su almacenamiento hídrico del reservorio “suelo”, la precipitación pluvial constituye un alto porcentaje (en algunos casos total) del contenido de agua en el suelo; pero parte de la lluvia que se dispone la planta para su desarrollo es únicamente una fracción de ésta, la otra parte se pierde por escorrentía y por percolación profunda o evaporación.

#### **2.2.2 Medición del agua en el 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, entre otros.

#### **Método gravimétrico**

Enciso (2005), habla que para determinarlo tomar muestras de suelo a diferentes profundidades empleando un tubo de extracción de muestras de suelo. Por lo general se toman muestras de los siguientes perfiles: 0-15 cm, 15-30 cm, 30-45cm y 45-60cm. En algunos suelos puede ser deseable tomar muestras a profundidades de 90 cm, en función del grado de pérdidas por percolación profunda y escorrentía, y de las características del perfil del suelo. El porcentaje de humedad del suelo ira variando con el transcurrir del tiempo, conformándose así la curva gravimétrica. El contenido de agua del suelo (%) se calcula mediante la siguiente formula:

$$\% \text{ HUMEDAD} = \frac{(Psh. - Pss.)}{pss.} * 100$$

Donde:

Psh : peso de la muestra extraído del suelo

Pss : peso seco de la muestra

### **Tensiómetros**

Indican la presión negativa que han de realizar las raíces para extraer del suelo la humedad que necesita el cultivo. No mide el porcentaje de humedad en la tierra, sino que actúa como una verdadera raíz artificial. La tierra seca extrae líquido del Irrometer produciendo un vacío parcial en el instrumento que queda reflejado en el vacuómetro. Cuanto más seca la tierra, más alto el valor registrado en el dial del vacuómetro (Catálogo de Irrometer 2012). Generalmente operan con garantía de 0 a 85 cbar, pero están calibrados de 0 a 100 cbar. (padilla, 2016).

### **Sensores Watermark**

Está formado por dos electrodos concéntricos empotrados en un conglomerado especial sujetado por una membrana sintética y encapsulado en una funda de acero inoxidable. Incorpora un disco amortiguador para reducir la influencia de la salinidad en las lecturas. Correctamente instalado responde con rapidez a los cambios de humedad del suelo (Irrometer, sf).

## **2.3 Evapotranspiración**

Israelsen y Hansen (1985); manifiestan que es la suma de los términos; transpiración, y evaporación, que es el agua evaporada por el terreno adyacente, por la superficie del agua o por la superficie de las hojas de las plantas. Además, ambos procesos se producen simultáneamente y no existen métodos sencillos para separarlos, por lo que ambos procesos se engloban generalmente bajo el término evapotranspiración.





**Figura 3: Definición de la evapotranspiración**

FUENTE: elaborado por Chacón, 2018

### 2.3.1 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 para considerar al evaluar el proceso de la evaporación. (Allen et al, 2006).

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. (Allen et al, 2006).

### **2.3.2 Transpiración**

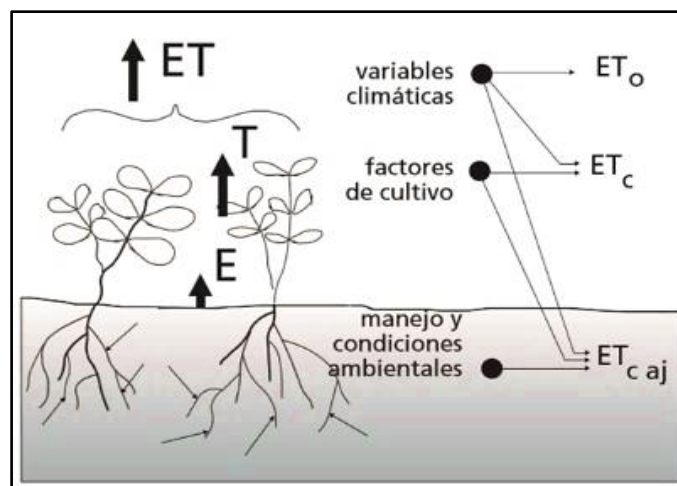
La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de las estomas. Estos son pequeñas aberturas en la hoja de la planta a través de las cuales atraviesan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmósfera. 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. (Cáceres, 2017).

La transpiración es un proceso vital para las plantas, necesario para enfriar las hojas y transportar agua y nutrientes. Consiste en la emisión de vapor de agua hacia el aire circundante a través de las estomas. Depende de la presión de vapor en la cavidad ubicada por detrás de las estomas y del aire circundante dentro del invernadero. Aquí, el aire se encuentra saturado con vapor de agua y el aire de la atmósfera circundante se encuentra más seco que este, por tanto, el vapor difundirá por el gradiente de concentración. A medida que las estomas se encuentren más abiertos, la difusión será más rápida y la resistencia será menor. (Ruiz, 2016).

De Santa Olalla (2005), menciona que consiste en la vaporización de agua líquida contenida en los tejidos de la planta y en el transporte del vapor de agua a la atmósfera.

### 2.3.3 Factores que influyen la evapotranspiración

Según FAO (2008), El clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo son factores que afectan la evapotranspiración.



**Figura 4: Factores que afectan la evapotranspiración**

FUENTE: Allen et al, 2006

#### **Variables climáticas**

Estas son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Se han desarrollado varios procedimientos para determinar la evaporación a partir de estos parámetros.

#### **Factores de cultivo**

El tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo deben ser considerados cuando se evalúa la evapotranspiración de cultivos.

#### **Manejo y condiciones ambientales**

Tales como la 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. También se ve afectada debido a la cubierta del suelo, la densidad del cultivo y el contenido de agua. (Allen et al, 2006).

## 2.4 Evapotranspiración de cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>)

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.

FAO (2006), los únicos factores que afectan la evapotranspiración de referencia son los elementos climáticos, por lo tanto, la ET<sub>o</sub> es también un elemento climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos.

García (1990), aduce que no siempre la ET<sub>o</sub> es mayor que la evapotranspiración real (Etc.), ya que, en las fases de intenso desarrollo del cultivo, sin déficit de agua, ocurre lo inverso. Esto dio origen al término evapotranspiración de referencia.



**Figura 5: Evapotranspiración de cultivo de referencia**

FUENTE: Allen et al, 2006

Se han desarrollado numerosos métodos que permiten estimar la evapotranspiración en cultivos. Estos van desde métodos sencillos que determinan la ET<sub>o</sub> de manera directa a métodos indirectos o micro meteorológicos que consisten principalmente en ecuaciones empíricas con base en variables climáticas.

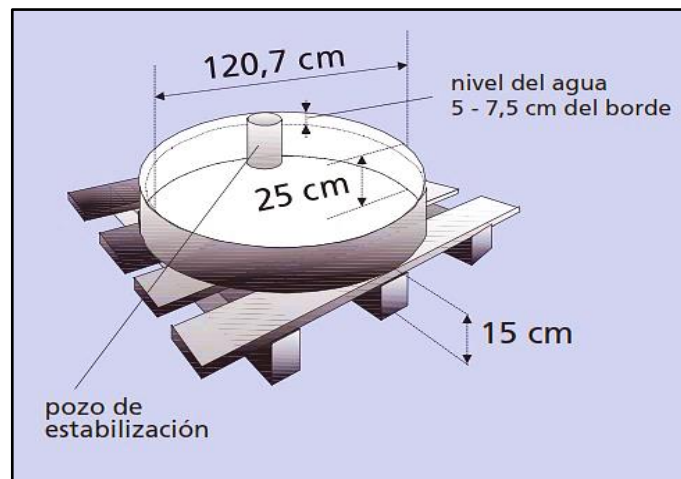
### 2.3.1 Método del tanque de evaporación

Permite estimar la ET<sub>o</sub> de manera directa mediante un tanque de evaporación, el tanque evaporímetro más usado es el del tipo A, el cual proporciona un índice del efecto integrado de la radiación, la temperatura del aire, la humedad del aire y del viento en la

evapotranspiración; siendo utilizado con éxito para estimar la evapotranspiración de referencia observando la pérdida por evaporación de una superficie de agua y aplicando coeficientes empíricos para relacionar la evaporación del tanque con ETo.

FAO (2006), el tanque Clase A es circular de 120,7 cm. de diámetro y 25 cm. de profundidad, está construido de hierro galvanizado o de láminas de metal (0,8 mm). Se sitúa sobre una plataforma de madera en forma de reja que se encuentra a 15 cm. por encima del nivel del suelo. Una vez instalado, el tanque se llena con agua hasta 5 cm. por debajo del borde y el nivel del agua no debe disminuir hasta más de 7,5 cm. por debajo del borde. El agua debe ser regularmente cambiada, al menos semanalmente, para eliminar la turbidez. Si el tanque es galvanizado, debe ser pintado anualmente con pintura de aluminio. Las mallas sobre los tanques deben evitarse. Los tanques deben ser protegidos con mallas de seguridad para evitar el acceso de los animales.

Un aspecto importante del método del tanque evaporímetro es que el almacenaje de calor dentro del tanque puede ser apreciable y puede causar una significativa evaporación durante la noche mientras que la mayoría de los cultivos transpiran solamente durante el día. (Allen et al. 2006).



**Figura 6: Características del tanque evaporímetro tipo A**

FUENTE: Tomado de Allen et al. 2006.

La evaporación obtenida del tanque evaporímetro se relaciona con la evapotranspiración a través de un coeficiente Kp.

$$ET_o = K_p \cdot E$$

Donde:

ET<sub>o</sub>: Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/día).

K<sub>p</sub>: Coeficiente empírico de tanque.

E: Evaporación libre de tanque clase A (mm/día).

El coeficiente del tanque evaporímetro depende de la cobertura del suelo donde se ubica el tanque -sus alrededores-, así como el viento y las condiciones generales de humedad. Por lo que, la localización y el ambiente del tanque evaporímetro también tienen influencia en los resultados. De ser el caso que existan algunos ajustes propios de la instalación del tanque como pueden ser la decoloración del tanque, la oxidación de las mallas protectoras del tanque o alguna otra eventualidad se deberá afectar el K<sub>p</sub> de acuerdo con las variaciones propias del tanque (Allen *et al.* 2006).

**Tabla 3: Coeficientes del tanque evaporímetro (K<sub>p</sub>) para el tanque Clase A**

Tanque Clase A	Caso A: Tanque situado en una superficie cultivada				Caso B: Tanque situado en un suelo desnudo			
	HR media		baja < 40	media 40-70	alta > 70		baja < 40	media 40-70
Velocidad del viento (m s <sup>-1</sup> )	Distancia del cultivo a barlovento (m)				Distancia del barbecho a barlovento (m)			
Baja < 2	1	,55	,65	,75	1	,7	,8	,85
	10	,65	,75	,85	10	,6	,7	,8
	100	,7	,8	,85	100	,55	,65	,75
	1 000	,75	,85	,85	1 000	,5	,6	,7
Moderada 2-5	1	,5	,6	,65	1	,65	,75	,8
	10	,6	,7	,75	10	,55	,65	,7
	100	,65	,75	,8	100	,5	,6	,65
	1 000	,7	,8	,8	1 000	,45	,55	,6
Alta 5-8	1	,45	,5	,6	1	,6	,65	,7
	10	,55	,6	,65	10	,5	,55	,65
	100	,6	,65	,7	100	,45	,5	,6
	1 000	,65	,7	,75	1 000	,4	,45	,55
Muy alta > 8	1	,4	,45	,5	1	,5	,6	,65
	10	,45	,55	,6	10	,45	,5	,55
	100	,5	,6	,65	100	,4	,45	,5
	1 000	,55	,6	,65	1 000	,35	,4	,45

FUENTE: Tomado de Allen et al. 2006.

### 2.3.2 Datos meteorológicos

Cáceres (2017), menciona que los métodos para calcular la evapotranspiración a partir de datos meteorológicos requieren de varios parámetros climatológicos y físicos. Algunos de estos parámetros se miden directamente en estaciones meteorológicas. Otros parámetros se relacionan con los datos comúnmente medidos y se pueden derivar con la ayuda de relaciones directas o empíricas. Los factores meteorológicos que determinan la evapotranspiración son los componentes del tiempo que proporcionan energía para la vaporización y extraen vapor de agua de una superficie evaporante.

Los principales parámetros meteorológicos para considerar son las siguientes:

**a. Radiación solar:** El proceso de la evapotranspiración está determinado por la cantidad de energía disponible para evaporar el agua. La radiación solar es la más importante fuente de energía en el planeta y puede cambiar grandes cantidades de agua líquida en vapor de agua. La cantidad potencial de radiación que puede llegar a una superficie evaporante viene determinada por su localización y época del año. Debido a las diferencias en la posición del planeta y a su movimiento alrededor del sol, por lo que la cantidad potencial de radiación es diferente para cada latitud y para las diversas estaciones del año. La radiación solar real que alcanza la superficie evaporante depende de la turbidez de la atmósfera, la presencia de nubes que reflejan y absorben las cantidades importantes de radiación, pero cuando se determina el efecto de la radiación solar en la evapotranspiración, se debe también considerar que no toda la energía disponible se utiliza para evaporar el agua, debido a que parte de la energía solar se utiliza también para calentar la atmósfera y el suelo. Estos datos no están disponibles comúnmente en forma directa, pero pueden derivarse de la radiación de onda corta (promedio) medida a partir de la duración real diaria (promedio) del sol brillante (horas por día) medida con el heliógrafo. (Allen et al. 2006).

**b. Temperatura del aire:** La radiación solar absorbida por la atmósfera y el calor emitido por la tierra elevan la temperatura del aire. El calor sensible del aire circundante transfiere energía al cultivo y entonces ejerce un cierto control en la tasa de evapotranspiración. En un día soleado y cálido, la pérdida de agua por evapotranspiración será mayor que en un día nublado y fresco. (Allen et al. 2006). Para el cálculo de la ETo mediante la aplicación

de los diferentes métodos indirectos será necesario obtener datos de temperaturas (C°) máximas, mínimas y el promedio respectivo.

**c. Humedad del aire:** Mientras que el aporte de energía del sol y del aire circundante es la fuerza impulsora principal para la evaporación del agua; la diferencia entre la presión de vapor de agua en la superficie evapotranspirante y el aire circundante es el factor determinante para la remoción de vapor. Por lo que, las áreas bien regadas en regiones áridas secas y calientes, consumen grandes cantidades de agua debido a la gran disponibilidad de energía y al poder de extracción de vapor de la atmósfera. En cambio, en regiones húmedas tropicales, a pesar de que el ingreso de energía es elevado, la alta humedad del aire reducirá la demanda de evapotranspiración. En este último caso, como el aire está ya cerca de saturación puede absorber menos agua adicional y por lo tanto la tasa de evapotranspiración es más baja que en regiones áridas. (Allen et al. 2006).

**d. Velocidad de viento:** El proceso de remoción de vapor depende en alto grado del viento y de la turbulencia del aire, los cuales transfieren grandes cantidades de aire hacia la superficie evaporante. Con la evaporación del agua, el aire sobre la superficie evaporante se satura gradualmente con vapor. Si este aire no se substituye continuamente por un aire más seco, disminuye la intensidad de remoción de vapor de agua y la tasa de evapotranspiración disminuye. (Allen et al. 2006).

La corrección para las variaciones de altura en que se mide la velocidad del viento se realiza con la siguiente ecuación (Allen et al. 2006):

$$V_2 = \frac{V_z * 4.87}{\ln(67.8 * z - 5.42)}$$

Donde:

V<sub>2</sub>: Velocidad del viento a 2 m sobre la superficie (m/s).

V<sub>z</sub>: Velocidad del viento medida a z (m) sobre la superficie (m/s).

z: Altura de medición sobre la superficie (m).

**e. humedad atmosférica:** El contenido de agua del aire se puede expresar de diversas maneras. En agrometeorología, la presión de vapor, la temperatura del punto de condensación (punto de rocío) y la humedad relativa son expresiones comunes para indicar la humedad del aire.



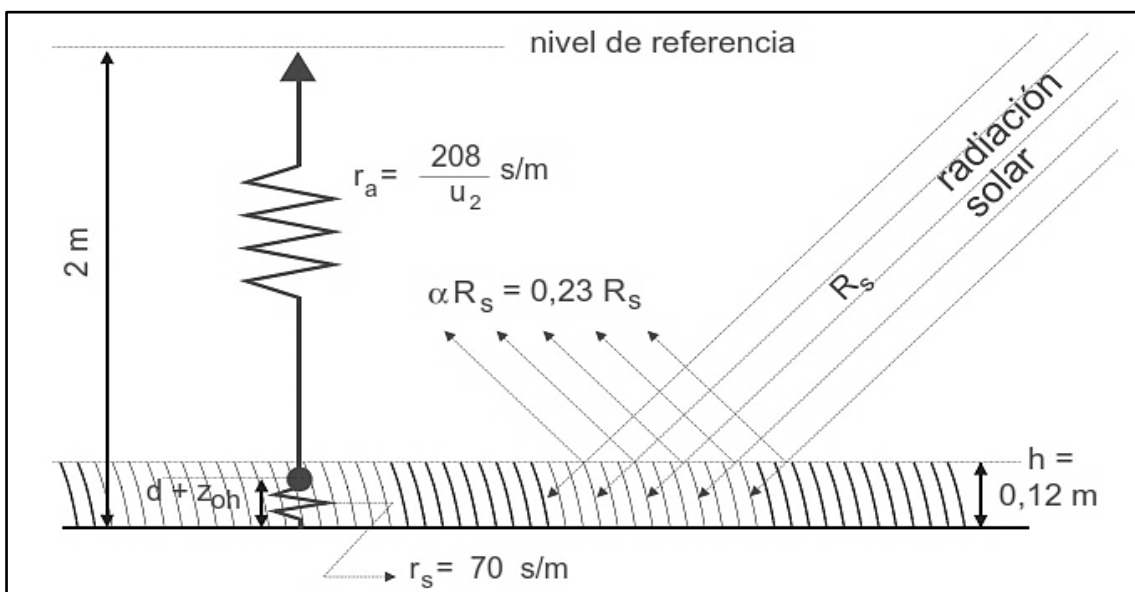
## Estación meteorológica

Hoy en día mediante una estación meteorológica automática, donde los datos meteorológicos se registran y procesan, es posible obtener datos instantáneos de evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), para la cual la estación emplea internamente la ecuación Penman – Monteith

### 2.2.4 Métodos de Penman – Monteith

El panel de expertos de la FAO recomendó la adopción del método combinado de Penman-Monteith como nuevo método estandarizado para el cálculo de la evapotranspiración de la referencia y aconsejó sobre los procedimientos para el cálculo de los varios parámetros que la fórmula incluye. El método FAO Penman-Monteith fue desarrollado haciendo uso de la definición del cultivo de referencia como un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia superficial de 70 s/m y un albedo de 0,23 y que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activa y adecuadamente regado. (Allen et al. 2006).

El método Penman-Monteith fue seleccionado como el método por el cual la evapotranspiración de esta superficie de referencia (ET<sub>o</sub>) puede ser inequívocamente determinada y con el cual se obtienen valores consistentes de ET<sub>o</sub> en todas las regiones y climas.



**Figura 7: Características del cultivo de referencia**

FUENTE: tomado de Allen et al. 2006.

Ecuación FAO Penman Monteith:

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

Donde:

- ET<sub>o</sub> : Evapotranspiración de referencia (mm día)
- Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C<sup>-1</sup>)
- R<sub>n</sub> : Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>)
- G : Flujo del calor de suelo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>)
- Γ : Constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>)
- T : Temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
- U<sub>2</sub> : Velocidad del viento a 2 m de altura (m s<sup>-1</sup>)
- E<sub>s</sub> : Presión de vapor de saturación (kPa)
- E<sub>a</sub> : Presión real de vapor (kPa)

La ecuación utiliza datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento. Para asegurar la precisión del cálculo, los datos climáticos deben ser medidos o ser convertidos a 2 m de altura sobre una superficie extensa de pasto verde, cubriendo completamente el suelo y sin limitaciones de agua. Cabe resaltar que la ecuación de FAO Penman-Monteith es una representación clara, precisa y simple de los factores físicos y fisiológicos que gobiernan el proceso de la evapotranspiración. (Allen et al. 2006).

## 2.5 Evapotranspiración de cultivo real (ET<sub>c</sub>)

Hargreaves (1975), manifiesta que la evapotranspiración real, es el uso potencial del agua bajo condiciones favorables y es equivalente a E<sub>c</sub>(cultivo), por los cultivos agrícolas incluyendo la evaporación directa de la humedad del suelo y de las plantas húmedas por las hojas.

Vásquez y Chang (1992), indican que es la tasa de evaporación y transpiración de un cultivo exento de enfermedades que crece en un campo (uno o más hectáreas) en

condiciones óptimas de suelo, fertilidad y suministro de agua. La evapotranspiración actual es llamada también uso consuntivo. Se calcula de la siguiente manera:

$$ETc. = Kc \times ETP$$

Dónde:

- Etc. : Evapotranspiración real o actual del cultivo (mm o cm)  
Kc : Coeficiente que tiene en cuenta el efecto de relación agua planta  
ETP : Evapotranspiración potencial o de referencia (mm o cm)

Para el cálculo de la evapotranspiración de cultivo bajo condiciones estándar (ETc.), las condiciones estándares del cultivo son: que se desarrollen en campos extensos, bajo condiciones agronómicas excelentes y sin limitaciones de humedad en el suelo. La evapotranspiración de un cultivo será diferente a la del cultivo de referencia (ETo) en la medida en que sus características de cobertura del suelo, propiedades de la vegetación y resistencia aerodinámica difieran de las correspondientes al pasto. Los efectos de las características que distinguen al cultivo del pasto están incorporados en el coeficiente del cultivo (Kc). En la metodología del coeficiente del cultivo, la evapotranspiración del cultivo se calcula multiplicando ETo por Kc. (Allen et al. 2006).

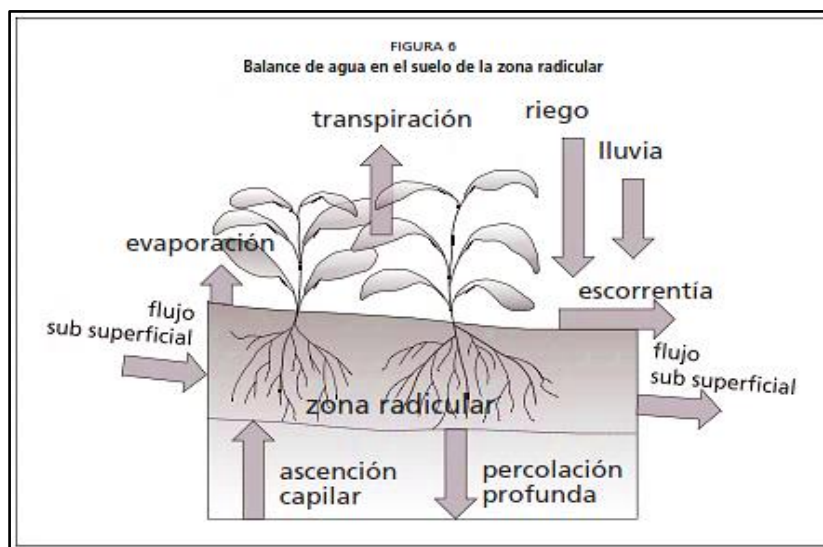
#### **2.4.1 Balance hídrico**

La evapotranspiración puede determinarse midiendo varios componentes del balance de agua en el suelo. García (1992). Indica que el balance hídrico es la evolución volumétrica de las entradas y salidas de agua a un sistema para conocer su disponibilidad. Para establecer un balance hídrico hay que conocer las entradas de agua que están dadas por el riego (R) medido volumétricamente y las salidas de agua del cultivo, las cuales se dan por la evapotranspiración (ETc), que es la pérdida de agua por evaporación desde cualquier superficie evaporante más la transpiración de la vegetación existente y por el drenaje (D), que es la pérdida de agua por percolación a través del suelo por efecto de la gravedad.

Allen et al. (2006). El método consiste en evaluar los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo dentro de un determinado periodo de tiempo (Figura 6). El riego (R) y la precipitación (P) proporcionan agua a la zona radicular. Parte de R y P

pueden perderse por escurrimiento superficial (ES), y percolación profunda (D) la cual eventualmente recargará la capa freática. El agua también puede ser transportada hacia la superficie mediante capilaridad (C) desde la capa freática subsuperficial hacia la zona de raíces o ser incluso transferida horizontalmente por flujo sub-superficial hacia dentro (FSin) o fuera (FSout) de la zona radicular ( $\Delta FS$ ). Sin embargo, excepto bajo condiciones de pendientes pronunciadas, normalmente los valores de FSin y FSout son mínimos y pueden no ser considerados. La evaporación del suelo y la transpiración del cultivo pueden agotar el agua de la zona radicular. Si todos los otros flujos aparte de la evapotranspiración (ET) pueden ser evaluados, la evapotranspiración se puede deducir a partir del cambio en el contenido de agua en el suelo ( $\Delta SW$ ) a lo largo de un periodo de tiempo:

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



**Figura 8: Balance de agua en el suelo de la zona radicular**

FUENTE: tomado de Allen et al. 2006

Si no se considerasen todas las variables poco significativas, difíciles para medir, y en caso no exista una exagerada pendiente la ecuación de balance dependerá básicamente de las siguientes variables: riego, lluvia, percolación profunda y variación de humedad en el suelo. (Triana *et al.*, 2015. Citado por Padilla, 2016). Por tanto, la ecuación de balance hídrico en el suelo sería la siguiente:

$$ET = R + P - D - \Delta SW$$

### **2.4.2 Lisímetros**

García, 1977. Los lisímetros o evapotranspirómetros son tanques rellenos con suelo en los cuales un cultivo crece bajo condiciones encontradas en el campo y sirven para medir la cantidad de agua perdida por evaporación y transpiración. Este método proporciona el medio directo de medir la evapotranspiración y es frecuentemente usado para estudiar los efectos climatológicos y para evaluar los diferentes métodos que hacen estimaciones de Etc.

Pacheco y Alonzo (1995), indican que los tanques o lisímetros son equipos que se usan para la determinación de la evaporación de un suelo desnudo o la evapotranspiración de un determinado cultivo, en este diseño de impermeabilidad se debe colocar los horizontes de suelo en la misma disposición natural del suelo, esto permite un adecuado crecimiento radicular, estos se clasifican en:

#### **a. Lisímetros de drenaje**

En ellos se miden diariamente el agua agregada y la drenada, la cual funciona por la diferencia de lectura de la evapotranspiración del cultivo.

#### **b. Lisímetros de pesada**

Diariamente se pesa el conjunto de suelos, plantas y agua junto con el tanque, siendo por la diferencia de pesada con el día anterior que se logra obtener la evapotranspiración.

#### **c. Lisímetros de compensación**

Automáticamente por un sistema de vasos comunicantes se compensa el agua que es gastada en el tanque, manteniéndose constante una lámina de agua que a determinada profundidad del suelo y del cultivo abastece por capilaridad a las plantas.

Las condiciones del suelo dentro del lisímetro deben ser esencialmente iguales a aquellos fuera del mismo. El lisímetro debe estar rodeado por el mismo tipo de cultivo que este plantado en él, localizado dentro del campo del cultivo. (Goyal y Gonzales, 2007).

### **2.6 Coeficiente de cultivo (Kc)**

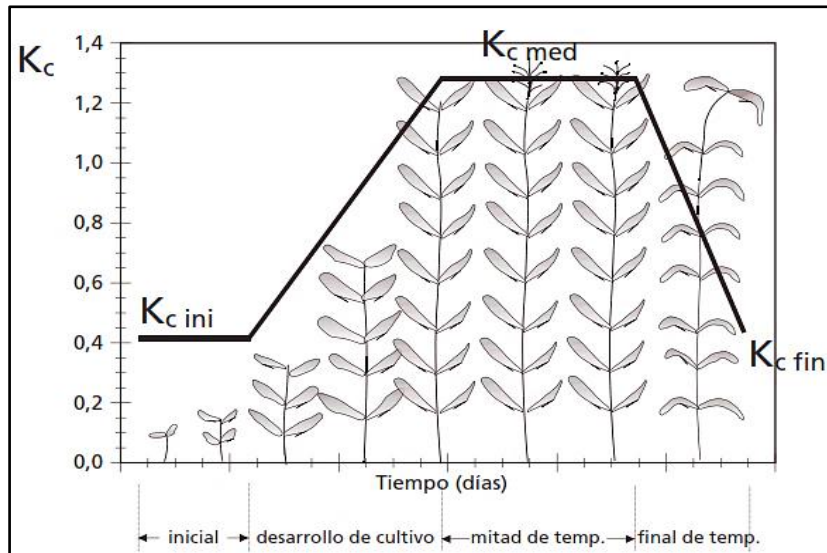
García (1992), señala que este es un parámetro que permite estimar la evapotranspiración real máxima de un cultivo en función de la evapotranspiración potencial o de referencia, es decir, el  $K_c$ . permite conocer las demandas hídricas de un cultivo en ausencia de lisímetros. Vásquez y Chang (1992) mencionan que el coeficiente de cultivo es un factor que indica el grado de desarrollo o cobertura del suelo por el cultivo del cual se requiere evaluar su consumo de agua.

El coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) permite conocer la demanda hídrica de un cultivo en ausencia de lisímetros. Si en el experimento del estudio de requerimientos hídricos del cultivo, hacemos funcionar paralelamente un evapotranspirómetro, entonces tendremos informaciones de evapotranspiración máxima ( $ET_c$ ) y de evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) y con los dos conjuntos de datos se determinarían los valores de  $k_c$ , haciendo uso de la relación que se expresa en la ecuación siguiente:

$$K_c = ET_o/ET_c$$

Donde  $ET_c$  puede ser la evapotranspiración medida por lisímetros y la  $ET_o$  es la evapotranspiración de referencia obtenida mediante el tanque evaporímetro ecuación de Penman – Monteith

Finalmente, Allen et al (2006) menciona que el  $K_c$  está relacionado con las fases de crecimiento del cultivo y se define a través de la curva de  $K_c$ . La cual describe cuatro fases: inicial, desarrollo del cultivo, mediados de temporada o intermedia y final de temporada. La fase inicial va desde la siembra hasta que el cultivo alcanza un 10% de la cobertura del suelo. La fase de desarrollo empieza cuando termina la etapa anterior y va hasta el crecimiento activo de la planta. La fase intermedia va desde la floración hasta que el cultivo alcanza el 70 -80% de cobertura máxima de cada cultivo y la fase final, va desde la madurez hasta la cosecha.



**Figura 9: Curva generalizada del coeficiente de cultivo**

FUENTE: tomada de Allen et al, 2006

### III. MATERIALES Y MÉTODOS.

#### 3.1 Localización del campo experimental

La experimentación se realizó en el área demostrativa del Departamento de Recursos Hídricos (DRH) de la facultad de Ingeniería Agrícola, de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Esta se realizó durante los meses de junio, julio, agosto y setiembre del año 2017.

Departamento : Lima  
Provincia : Lima  
Distrito : La Molina  
Latitud :  $12^{\circ} 04' 50.28''$  S  
Longitud :  $76^{\circ} 57' 04.85''$  W  
Altitud : 235 m.s.n.m

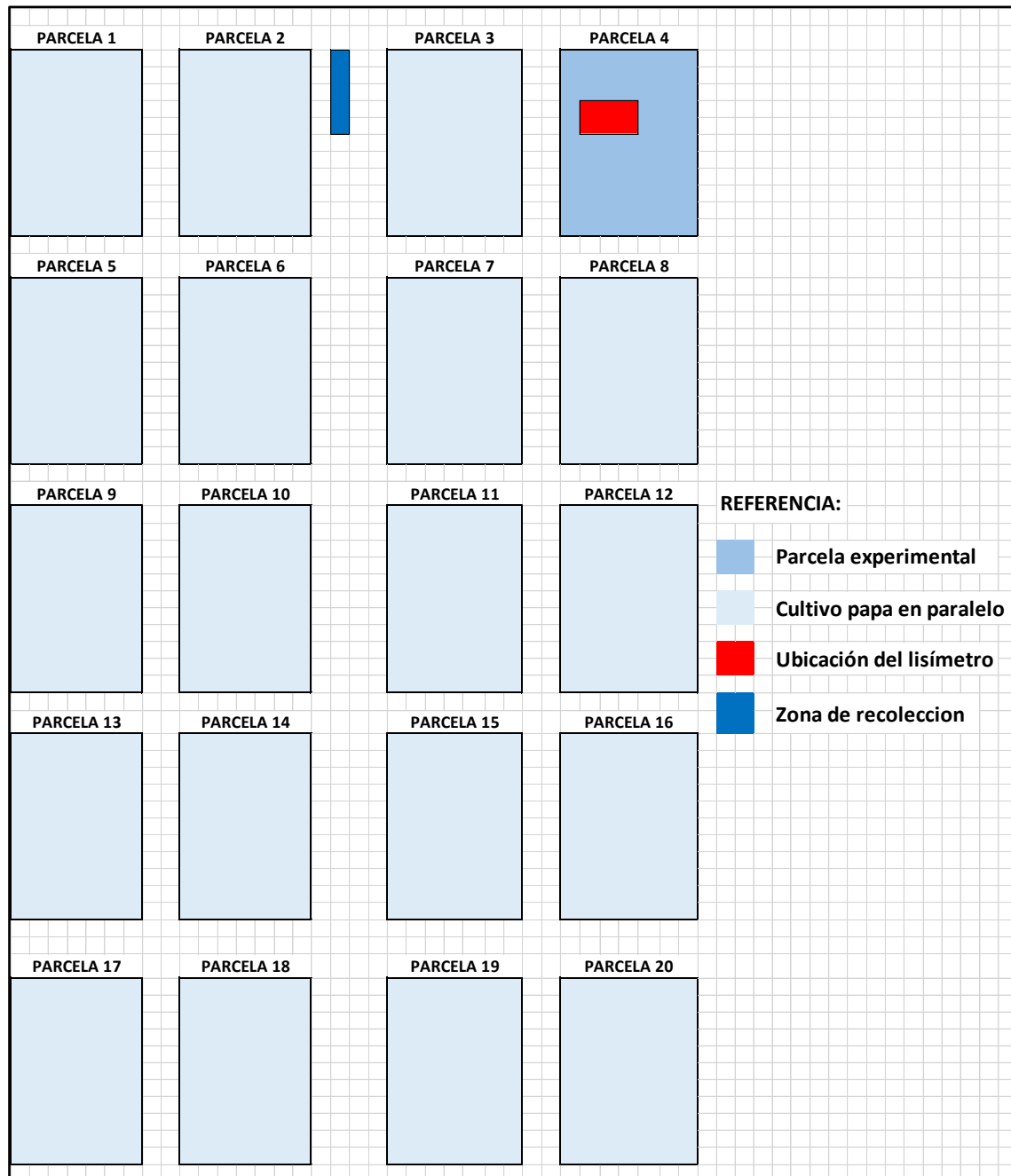


**Figura 10: Ubicación del área demostrativa**

FUENTE: tomado de Google 2018



Con respecto al lisímetro es importante resaltar que su ubicación dentro del área demostrativa se hizo al azar, teniendo en cuenta que su ubicación no esté cerca de árboles, raíces, acequias y caminos. Siguiendo con lo mencionado quedo definido que la ubicación del lisímetro este dentro de la parcela 4 como se muestra en la figura 11.



**Figura 11: Ubicación del área de estudio dentro del área demostrativa**

FUENTE: Propia

### 3.2 Características del área de estudio

#### 3.2.1 Características climáticas

Los datos climatológicos fueron obtenidos de la estación Davis, el cual pertenece al departamento de Recursos Hídricos de la Facultad de Ingeniería Agrícola (FIA). Las variables climáticas (tabla 4) mencionadas a continuación son correspondientes a la fase experimental:

**Tabla 4: Datos climáticos de la Estación Davis 2017 UNALM**

	<b>T. Máxima (C°)</b>	<b>T. Mínima (C°)</b>	<b>T. Promedio (C°)</b>	<b>Humedad Relativa (%)</b>	<b>Velocidad Del viento (m/s)</b>	<b>Horas de sol (hrs)</b>	<b>ETo (mm/mes)</b>
Junio	19.94	16.08	18.01	81.63	1.56	6.03	31.48
Julio	19.21	15.44	17.32	88.12	1.56	5.90	38.43
Agosto	18.47	14.33	16.4	90.85	1.55	6.70	37.23
setiembre	18.32	14.08	16.2	91.95	1.64	8.53	44.57

#### 3.2.2 Características del suelo

Las características iniciales del suelo se muestran a continuación:

**Tabla 5: Análisis de suelo - caracterización**

<b>pH (1:1)</b>	<b>CE (1:1) dS/m</b>	<b>Arena %</b>	<b>Limo %</b>	<b>Arcilla %</b>	<b>Textura</b>	<b>M.O %</b>
7.56	10.5	55.84	33	11.16	Franco Arenoso	1.49

**Tabla 6: Características hídricas del suelo**

<b>Profundidad (cm)</b>	<b>CC (%)</b>	<b>PMP (%)</b>	<b>Da (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Agua retenida (%)</b>	<b>Agua retenida (mm)</b>
0 - 15	19.4	9.4*	1.5	15.0	45.0

(\*) Para el cálculo del PMP se utilizó la fórmula de (Silva et al., 1988).

### 3.2.3 Características del Agua

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los análisis realizados en el Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertirriego de la Facultad de Ingeniería Agrícola:

**Tabla 7: Análisis de agua**

Parámetro	Unidades	Valor
CE	dS.m <sup>-1</sup>	0.66
Ph	-	7.52
Calcio	meq/l	4.90
Magnesio	meq/l	0.83
Sodio	meq/l	0.89
Potasio	meq/l	0.05
Suma de Cationes	meq/l	6.67
Cloruros	meq/l	1.13
Sulfatos	meq/l	2.67
Bicarbonatos	meq/l	2.83
Nitratos	meq/l	0.00
Carbonatos	meq/l	0.00
Suma de aniones	meq/l	6.62
SAR	-	0.52
Clasificación	-	C2-S1
Boro	ppm	0.57

FUENTE: Laboratorio de agua suelo, medio ambiente y fertirriego UNALM

### 3.3 Materiales y equipos

#### 3.3.1 Materiales en la preparación del terreno

Para el inicio del desarrollo del proyecto –en el cual se realiza la preparación del terreno–, se utilizó los siguientes materiales:

**Tabla 8: Materiales para la preparación del terreno**

Materiales	cantidad
Pico	1
Lampa	1

Rastrillo	1
Carretilla	1
Wincha mano	1
Cal	3kg

### 3.3.2 Materiales en la instalación del sistema de riego

Se aprovechó la instalación de un sistema de riego presurizado, financiado por el Proyecto de Innovación Tecnológica, 2016. Teniendo solo que asumir algunos materiales de riego.

**Tabla 9: Materiales usados en el sistema de riego**

Materiales*	cantidad	unidad
Mini válvulas de control de 16mm	4	Und.
Manguera ciega de 16mm clase 4mil	15	m.
Gotero autocompensado de 2.3L/hr marca Katif	1	Und.
Unión dentada de 16 mm	45	Und.
Terminal 8 para final de línea	3	Und.

(\*) Para más información véase anexo 1

### 3.3.3 Materiales para la construcción del lisímetro

La construcción del lisímetro se divide en dos zonas: zona del lisímetro y zona de descarga (el cual se detalla en la tabla 10)

**Tabla 10: Materiales usados para la construcción en la zona del lisímetro**

Materiales*	cantidad	unidad
Tanque contenedor rectangular de 1.2mx1m	1	Und.
Bolsa de cemento tipo I	1	Bols.
Arena gruesa	2	ft <sup>3</sup>
Piedra chancada 15mm	1/4	m <sup>3</sup>
Piedra chancada 2mm	1/4	m <sup>3</sup>

Malla raschell	1	m <sup>2</sup>
Tubo de pvc 3/4 " clase 10	1	Und.
Tubo de pvc 2" clase 10	1	Und.
adaptador 2" pvc	1	Und.
Unión roscada de 2" pvc	1	Und.
Reducción de 2" a 3/4" sp	1	Und.
Te de 2" sp	3	Und.
pegamento azul Oatey 8 oz	1	Und.
teflón	2	Und.

(\*) Para más información véase anexo 1

**Tabla 11: Materiales usados para la construcción en la zona de descarga**

<b>Materiales</b>	<b>cantidad</b>	<b>unidad</b>
Viga de madera simple de 2"x3"x6m	3	Und.
Tablas de 1cmx50cmx4m reciclado	3	Und.
Galonera de 20 l.	1	Und.
Malla raschell	2	m <sup>2</sup>
Clavos de 2"	1/2	kg

(\*) Para más información véase anexo 1.

### **3.3.4 Material vegetal**

Para este proyecto se utilizó la papa de variedad UNICA seleccionada por sus buenas características agronómicas y bromatológicas. Las principales características de esta variedad son su precocidad, su resistencia y su buena demanda en el mercado.

### **3.3.5 Equipos para monitoreo de la evapotranspiración**

Los materiales y equipos para el monitoreo de la evapotranspiración fueron facilitados por el departamento de recursos hídricos. Cabe resaltar que para el uso del tanque evaporímetro requiere una plataforma de apoyo y un micrómetro.

**Tabla 12: Equipos para el monitoreo de la evapotranspiración**

<b>Materiales</b>	<b>cantidad</b>
Tanque evaporímetro tipo A	1
Estación meteorológica automática Davis. Modelo Vantage pro-2	1

### **3.3.6 Materiales y equipos para la medición de la humedad en el suelo**

Los materiales y equipos usados para la medición de la humedad en el suelo se muestran a continuación:

**Tabla 13: Materiales y equipos para la medición de la humedad en el suelo**

<b>Materiales</b>	<b>cantidad</b>
Tensiómetro SR-212, 30 cm, Irrrometer*	1
Sensor de humedad del suelo Watermark	1
Medidor digital Watermark*	1
Horno de secado para laboratorio*	1
Barreno espiral para toma de muestra*	1
Balanza electrónica*	1
Sobres para secado de muestra	100

(\*) Fueron proporcionados por el laboratorio de riego y drenaje de la FIA, UNALM.

## **3.4 Metodología de la investigación**

### **3.4.1 Preparación del terreno**

La preparación del terreno se dio inicio en el mes de mayo. Iniciándose con la limpieza parcial del terreno, luego se procedió al riego pesado mediante el uso de aspersores móviles y una vez identificado el suelo apto para el laboreo se procedió a la labranza de este para su nivelación utilizando picos, rastrillos y carretilla. Finalizando esta etapa con la delimitación de la parcela para la cual utilizamos postes de madera y rafia. Ver anexo 02.

### **3.4.2 Caracterización del agua y suelo**

#### **Análisis de agua**

El agua usada para el riego proviene del río Rímac, el cual es conducido y almacenado en un reservorio de 500m<sup>3</sup>, perteneciente a la FIA. Siendo, importante realizar un análisis rutinario del agua almacenada para corroborar si es apto para el riego. El cual viene realizando constantemente para dar inicio a la siembra, tomando una muestra in situ y analizarlo en el laboratorio de agua, suelo y medio ambiente de la Facultad de Ingeniería Agrícola.

#### **Análisis de Suelo**

Antes de la construcción del lisímetro se recomienda realizar la caracterización del suelo y una vez terminada la construcción del lisímetro se volvió a realizar otro ensayo de caracterización del suelo. Con la finalidad de corroborar de que no existe una alteración significativa en el suelo -antes y después del acondicionamiento del lisímetro-. Siendo, este proceso realizado en el laboratorio de agua, suelo y medio ambiente la Facultad de Ingeniería Agrícola.

Para determinar la densidad aparente fue necesario realizar una calicata de 1.0 m de ancho, 1.0 m de largo y 0.5 m de profundidad; posteriormente realizándose la toma de muestras con el cilindro muestreador de suelo; tres (03) muestras a profundidad de 15 cm y 30cm c/u. Luego de realizado la construcción del lisímetro se procedió a la realización de otra calicata -dentro de la construcción-, de dimensiones de 0.4 de ancho, 0.4 de largo y 0.5m de profundidad, procediéndose a realizar de la misma forma la toma de muestra del suelo resaltando la densidad aparente entre la relación del peso suelo seco y el volumen del cilindro.

Para determinar el porcentaje de humedad en el suelo se realizó por el método gravimétrico que consiste en saturar un (01) metro cuadrado de área, previa delimitación de esta para que el agua no desborde, luego esta es cubierta en su totalidad con un plástico oscuro a fin de conservar la humedad. Al día siguiente se comenzó con la toma de muestra que consistió en extraer tres (03) muestras por día para una profundidad de 15 y 30 cm; volviéndose a tapar con el plástico hasta el día siguiente, finalmente la muestra fue llevada a una estufa a 105 °C.

El capítulo (2.2) se detalla con precisión la fórmula para determinar la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez (PMP). Proceso que se hizo durante cuatro (04) días

repitiéndose el mismo procedimiento del método gravimétrico luego de la construcción del lisímetro.

### 3.4.3 Sistema de riego.

La parcela 4; donde se realizó el experimento ya contaba con una instalación primaria de riego presurizado, por lo que solo se ejecutó la instalación de las líneas de riego con sus respectivos goteros katif auto compensado de 2.3l/hr los cuales fueron instalados cada 0.3m. Mientras que los laterales de riego que conforman L1 y L2 fueron a doble línea para independizar el riego dentro del lisímetro. Los laterales también llevaron consigo una válvula de paso para el control manual del flujo.

Para el tendido de los laterales de riego se utilizó un marco de plantación con una separación entre plantas de 0.3m y entre franjas de 0.9 m. con el fin de conseguir un mayor número de ejemplares por superficie de cultivo y lograr un mejor aprovechamiento de la superficie. Para mayor detalle (Ver figura 12).

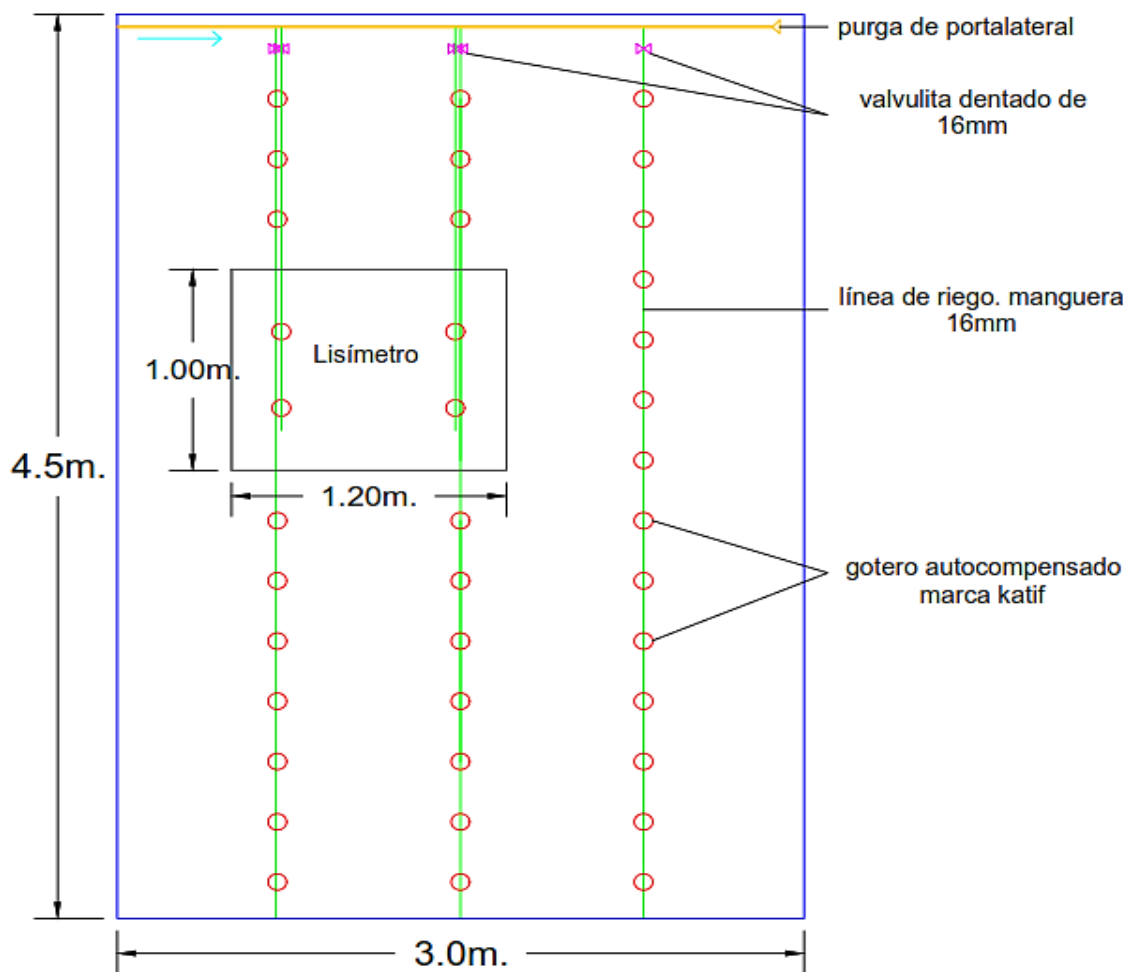
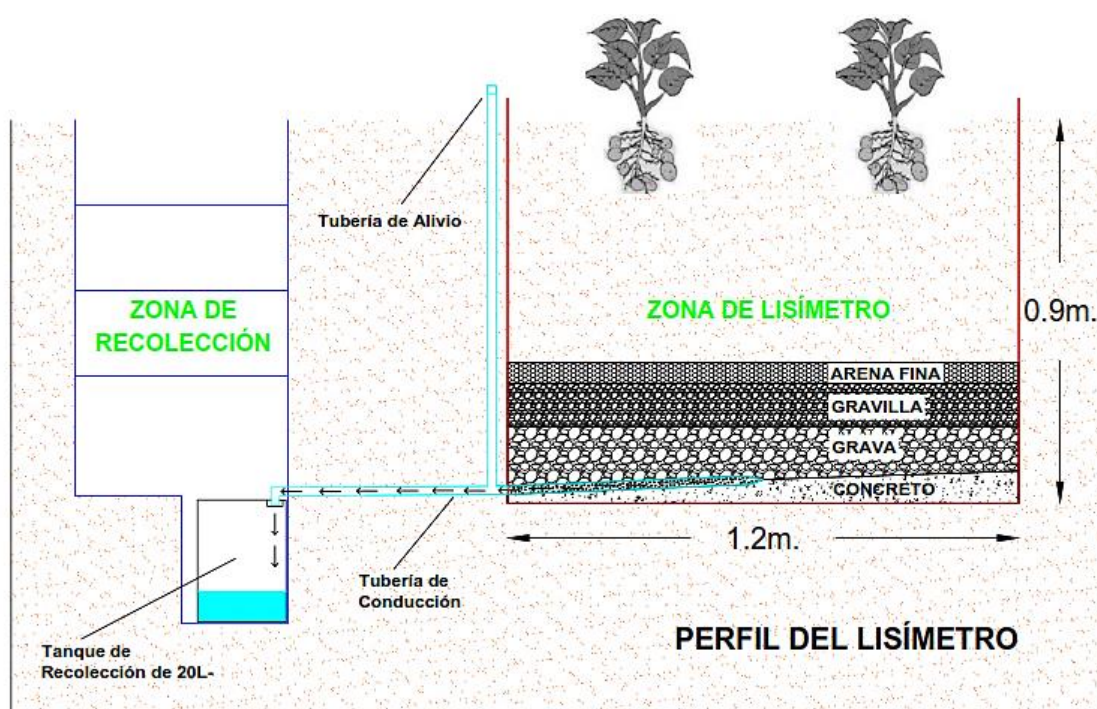


Figura 12: Sistema de riego en la parcela 4



### 3.4.4 Diseño, construcción e instalación del lisímetro

Para la ejecución de la investigación se construyó un lisímetro de drenaje de 1.2 m<sup>2</sup> de área, cuya dimensión fue determinada acorde a las diferentes características fisiológicas del cultivo como: la profundidad radicular, la distancia entre surcos y el área que le corresponde a cada una de las planta de papa UNICA. Por lo que, toda la etapa constructiva se realizó siguiendo cada una de las pautas obtenidas en las investigaciones anteriores. A continuación, se muestra el diseño planteado de un lisímetro de drenaje. Diseño a mayor detalle en el anexo 3 y anexo 4.



**Figura 13: Esquema del lisímetro de drenaje**

En la figura 13 se detalla los componentes principales del lisímetro de drenaje, los cuales son: zona del lisímetro y la zona de recolección.

#### **Zona de lisímetro**

Una vez definido la ubicación del lisímetro siguiendo las condiciones como estar dentro de un cultivo mayor, a campo abierto y libre sombra. Se procedió al proceso constructivo, el cual se empezó con la excavación de 1.2m de largo por 1.5 de ancho por 1.2 metros de profundidad. Donde, el volumen de la excavación es un tamaño superior a la del tanque

(figura 14) esto con la finalidad de tener una mejor maniobrabilidad al momento de la instalación.

El tanque usado es un recipiente rectangular de 1.2 metros de largo por 1 metro de ancho y 0.9 metros de alto, el cual tiene incluido una válvula de 2"-insertada de fabricación-, y con incluido con una plataforma metálica, la cual también se utilizó para dar un mejor soporte estructural a nuestro lisímetro.

Una vez instalado el tanque se procedió a colocar un mortero dentro de la base; luego del posterior vaciado del mortero, se realizó una ligera pendiente y púlido. La formación de la pendiente se hizo para dirigir toda el agua drenada hacia un punto en específico que es la válvula de salida del tanque. En el fondo del tanque se colocó una tubería de 2" que ayudaría a conducir el agua percolada hacia salida del tanque y en la parte superior de la tubería se realizó perforaciones de 4mm de diámetro que servirá como captación del agua. (Mayor detalle en el anexo 03)



**Figura 14: Tanque utilizado para la construcción del lisímetro**

Terminado el secado y curado del mortero se procedió a colocar la tubería recolectora del agua siguiéndose con la conformación de los estratos, que servirán como filtros de nuestro lisímetro, empezando por la colocación de una capa de 10cm de grava de ½"; continuando con la capa de 10cm de gravilla de 5mm, para luego colocar la última capa de 5cm de arena fina. Cabe resaltar que antes de la conformación se realizó un lavado previo a todos los materiales que conforman los estratos. Ver figura 15.



**Figura 15: Uso de grava como material filtrante**

Un problema muy frecuente en la realización de un lisímetro de drenaje es la acumulación de humedad en su suelo, el cual no es debido al drenaje sino a la rotura de la conductividad hídrica que tiene el suelo, a consecuencia del cambio brusco del estrato suelo propio con el estrato de gravas. Es por ello, que aplicamos una capa de arena fina que asegure la continuidad en la conductividad del suelo.

Una vez terminado de colocar los estratos filtrantes se colocó el suelo propio. Esto se hizo conforme se encontró el suelo al momento de realizar la excavación, respecto a su posición. Por lo que, se procedió a realizar la compactación del suelo húmedo por cada capa de 10cm.

Todos estos procedimientos se hicieron con la finalidad de no alterar la estructura inicial del suelo antes de la construcción del lisímetro. (Ver anexo 04). Siendo importante dejar un borde libre 5cm para evitar pérdidas por desplazamientos al momento del riego. Terminado la construcción de la parte interna del lisímetro se realizó la conexión de la válvula de 2" (salida) hacia la zona de recolección; previo a ello se colocó un desfogue que actuará como un alivio y facilitará el drenaje. Y, para la conducción del agua drenada se hizo la reducción de 2" a 3/4" esto con fines económicos; por último, se fijó la instalación con concreto para evitar el movimiento de las conexiones luego del posterior tapado. (Ver figura 16).





**Figura 16: Conexión del desfogue y alivio**

### **Zona de recolección**

Para integrar la zona del lisímetro y la zona de recolección se realizó el zanjado de 6 metros de largo y 1 metro de profundidad donde se colocó la tubería de conducción de 3/4" clase 10; esta tubería se instaló con una inclinación descendente de 1% tomando como base la salida del lisímetro como se muestra en el (anexo 03). Cabe resaltar la separación entre la zona del lisímetro y la zona de recolección es de 6 metros evitando alteraciones en la conductividad de la humedad y/o temperatura del en el suelo.

Terminada la construcción anterior se realizó la construcción de la zona de descarga, el cual nos permitirá recoger de forma segura y precisa el agua drenada. Para ello se hizo una excavación de 2.5 metros de largo por 0.6 metros de ancho y 1,2 metros de profundidad; el cual, se realizó en forma de gradas.

En la figura 17 se muestra el acabado final de la zona de recolección el cual terminada la excavación se recubrió con planchas de madera reciclada y para tener una mejor accesibilidad se construyó tres gradas, el cual también fue revestido con planchas de madera. Esta zona cuenta con un depósito de 20L para almacenar el agua drenada y tiene una entrada pequeña que recibe el agua mediante un codo de 90°x 3/4" proveniente de la zona del lisímetro. Al finalizar la construcción se consideró necesario la construcción de un pequeño techo en base a listones de madera y malla raschell 90% ayudando así a evitar la muestra drenada ya sea por evaporación o precipitación Ver anexo 3.



**Figura 17: Zona de recolección**

### **3.4.5 Instalación y desarrollo del cultivo a investigar**

Es muy importante resaltar que la investigación se realizó dentro y en paralelo a un cultivo mayor de papa variedad Unica, siendo el área total bruta sembrada de 270m<sup>2</sup> y por efectos de ser una investigación en conjunto solo se evaluó la parcela 4; el cual contiene al lisímetro donde se realizó la aplicación y toma de datos. Cabe mencionar que en el anexo 10 también se presentaran algunos resultados a fin de comparación.

#### **3.4.5.1 Siembra en el lisímetro**

Previo a realizar la siembra se realizó un riego pesado para proceder a la siembra de la papa variedad Unica, el cual se realizó mediante la siembra directa a una separación entre hileras de 0.8m y de 0.3m entre plantas y a una profundidad de 0.1m como se muestra en la figura 18. El número de plantas sembradas en el lisímetro fue de 4 unidades.



**Figura 18: Siembra en el lisímetro**

#### **3.4.5.2 Parámetros biométricos**

Durante el proceso del cultivo es conveniente realizar tomas de datos de los principales parámetros biométricos y el posterior rendimiento del cultivo. Los principales parámetros tomados a consideración son:

##### **Altura de planta.**

Para la evaluación del crecimiento en altura de las plantas se midieron en 4 oportunidades (una vez por etapa fenológica) y puesto que el lisímetro contenía solo 4 plantas se tomaron las medidas de cada una de estas para una mejor precisión en la toma de datos. La medida se toma desde el cuello de la planta hasta la altura de la yema terminal del tallo principal.

##### **Número de tallos**

Se determina contando el número de tallos por planta. Esta lectura se realizó a partir del día 30 donde se realizó el aporque; y luego en el día 106 después de la siembra.

#### **3.4.5.3 rendimientos y sus componentes**

##### **Número de tubérculos por planta.**

Se realiza la toma del número de tubérculos por planta y según calibre de los tubérculos en la (tabla 14). También se realizó un promedio como dato final.

### Tamaño de tubérculos

Para la clasificación, se toma como referencia la clasificación planteada por Sifuentes (2012), agrupadas en cinco categorías de acuerdo con su longitud o diámetro radial.

**Tabla 14: Descripción de calibres o diámetros de tubérculos de papa.**

<b>categoría</b>	<b>Diámetro longitudinal (cm)</b>
Extra	> 9.0
Primera	7.5 - 9.0
Segunda	6.0 - 7.5
Tercera	4.5 - 6.0
"chancho o descarte"	< 4.5

FUENTE: Sifuentes, 2012

### Rendimiento por planta

Se realiza en pesaje total de la papa por planta, luego se procede a expresar el resultado en  $\text{Kg ha}^{-1}$ .

#### 3.4.6 Monitoreo de la humedad en el suelo

El monitoreo de la humedad en el suelo sirvió para corroborar que el suelo este a capacidad de campo (CC) y así poder saber el momento de inicio del riego. Para esta investigación se utilizó un tensiómetro Irrrometer y un sensor Watermark el cual tuvieron que ser calibrados realizando la toma de datos en simultaneo por el método gravimétrico que consiste en determinar el porcentaje de humedad en el suelo y la vez realizar la toma de datos del sensor y tensiómetro. Esta prueba se realizó durante un plazo de 5 días.

### Tensiómetro

Dentro del lisímetro se instaló 1 tensiómetro 0-100 centibares (cbar), a una profundidad de 30cm. Para su instalación se siguieron las recomendaciones de los manuales del fabricante, el cual indica que antes de ser llevado a campo se deben sumergir en agua destilada las puntas de cerámica del tensiómetro durante al menos 24 horas. Posteriormente con un tornillo se procede a realizar el agujero de 30cm, luego se inserta



el tensiómetro teniendo mucho cuidado a que quede espacios vacíos entre la punta de cerámica y el suelo con lo cual obtendríamos valores errados. Las lecturas del tensiómetro fueron tomadas cada día entre las 5 y 6 pm.

### **Sensor Watermark**

La instalación del sensor es similar a la del tensiómetro por lo que un día antes de la instalación se dejó sumergido en agua destilada. Ahora para su instalación también se usó el tornillo muestreador para realizar la perforación del suelo a una profundidad de 30cm; Luego se insertó el sensor haciendo presión apoyándonos de una tubería de 1/2", el cual también sirve de protección del cable de toma de datos (figura 19). Cabe mencionar que el suelo estaba en condiciones muy próximas a capacidad de campo, por ello el suelo no ofreció una resistencia importante asegurando que el sensor no sufra daños durante la instalación y también garantizó que no existan espacios vacíos al empujar el sensor contra el suelo.

La toma de datos se hace de forma diaria y para ello se requirió un medidor digital Watermark (figura 20).



**Figura 19: Instalación del sensor Watermark**





**Figura 20: Medidor digital Watermark**

### **Calibración de equipos**

Las mediciones tanto en los tensiómetros y sensores Watermark son fáciles de realizar, pero su instalación requiere de una previa calibración, es por ello se para determinar la curva de humedad del suelo mediante el método gravimétrico, los pasos a seguir fueron los siguientes:

- Se realiza un riego de saturación, luego se instalaron el tensiómetro y el sensor Watermark a una profundidad de 30cm.
- Al día siguiente se procedió a realizar las primeras lecturas del tensiómetro y del sensor, obteniendo una muestra del suelo para determinar su humedad usando el método de la estufa por diferencia de pesos. Se tomó tres (03) muestras a una profundidad de 30cm.
- Se realizó la toma de muestras del suelo en paralelo para determinar su % de humedad, el cual duro alrededor de 5 días a partir de iniciado la saturación.
- 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.

### **3.4.7 Medición de la evapotranspiración de referencia**

#### **Operación del tanque evaporímetro**

Para obtener datos de evaporación de referencia se utilizó un tanque evaporímetro tipo A (figura 21), teniendo en cuenta los requerimientos de limpieza, protección y mantenimiento que debe tener un tanque de evaporación. La toma de lectura se realizó de forma diaria a las 5pm, el cual consiste en el diferencial de la lectura anterior y la actual, por el cual se obtuvo del micrómetro y a este resultado se le multiplico por el respectivo coeficiente de tanque (Kt).

El tanque está ubicado en una superficie cultivada situado a 400 metros del área de cultivo, durante esta campaña se registró una velocidad del viento promedio de 1.54 m/s, una humedad relativa promedio de 90.12%, por lo que consideramos un Kt de 0.85, el cual se obtuvo mediante la tabla 3.



**Figura 21: Tanque evaporímetro tipo A**

FUENTE: tomado de padilla, 2016

### **Estación meteorológica**

Los datos de la estación meteorológica fueron proporcionados por el laboratorio de hidráulica de la facultad de ingeniería agrícola (figura 22). La estación Davis Vantage Pro-2 está configurado para proporcionar información de las principales variables meteorológicas a un intervalo de 60 minutos; dichas variables también nos permitirán poner obtener resultados de evapotranspiración en base a otros métodos indirectos.



**Figura 22: Estación Davis Vantage**

FUENTE: tomado de Churasakari, 2012

### **3.4.8 Balance hídrico en el suelo (cálculo de la ET<sub>c</sub>)**

El balance hídrico nos permite estimar la evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>) utilizando un lisímetro, el cual permite establecer la relación entre la cantidad de agua ingresada por riego (R), por precipitación (P), además la cantidad de agua excedente por percolación (D), y la variación de la humedad ( $\Delta SH$ ), integrándose en la siguiente ecuación:

$$ET_c = R + P - D \pm \Delta SW$$

La humedad del suelo en los lisímetros se mantiene a un nivel óptimo alrededor de la humedad a capacidad de campo, los mismos que fueron controlados mediante el tensiómetro y el sensor Watermark, pero para tener una mayor precisión en esta investigación si se consideró esta variable ( $\Delta SW$ ). Previa calibración del sensor y tensiómetro se toma las lecturas antes del inicio cada riego y teniendo como base las lecturas a capacidad de campo obtendremos la variación de humedad; luego considerando la densidad aparente y área del lisímetro estas lecturas fueron traducidas a milímetros (mm.).

Debido a que tenemos 2 variables en cuanto a la variación de humedad, esto nos proporcionara 2 valores de evapotranspiración de cultivo interpretándose de la siguiente manera: ET<sub>c</sub> tensiómetro y ET<sub>c</sub> Watermark

## **Riego**

Antes de realizar la siembra se procede a efectuar un riego pesado e inmediatamente se instaló los sensores de humedad. Una vez alcanzado una humedad optima se realizó la siembra e inmediatamente se procedió al riego, siendo la primera lamina de riego inicial que se calculó en función la evapotranspiración de referencia del tanque tipo A, el cual se efectuó desde el riego pesado hasta el día de la siembra, considerando también la variación de humedad según indica el sensor calibrado. Todo ello expresado en (mm) y considerándose el coeficiente de uniformidad de los goteros.

Para los siguientes riegos, el análisis se realizó en función al tanque evaporímetro, el cual mediante diferencia de lecturas en el micrómetro obtenemos la evapotranspiración de referencia expresado en lamina (mm), considerando un  $K_t$  de 0.85 obtenemos el ETo; luego, se añadió un 50 % más para asegurar el drenaje obteniendo como resultado la lámina a aplicar. Finalmente, esta lámina fue llevada a volumen multiplicándole por el área del lisímetro de 1.2m<sup>2</sup> y aplicado mediante el riego por goteo considerando el coeficiente de uniformidad de 0.93.

El intervalo de riego estuvo condicionado a cuando el suelo este lo más cercano a capacidad de campo (CC), valor que indicaba el tensiómetro y el sensor Watermark, por lo general cada 2 días.

## **Precipitación**

Esta variable expresada en mm/día la obtuvimos mediante la estación meteorológica. Durante el mes de agosto y setiembre se obtuvo precipitaciones de 0.25mm y 0.5mm respectivamente.

## **Drenaje**

Antes del inicio de cada riego se efectuó la medición del agua drenada donde la variable importante para el cálculo del volumen a aplicar en el riego se realizaba inmediatamente después. Para transformar a lámina se divide el volumen total entre el área del lisímetro.

### **3.4.9 Coeficiente de cultivo**

El cálculo del Coeficiente de Cultivo  $K_c$  se realiza utilizando los datos de Evapotranspiración del Cultivo, ETC obtenidos a través del lisímetro y los datos de

Evapotranspiración Potencial del Cultivo de Referencia  $E_{To}$  obtenidos con método del tanque de evaporación tipo A. En cuanto a la estimación de la  $E_{To}$ , esta también se obtuvo mediante el método Penman Monteith y de forma directa a través de la estación Davis. También es importante mencionar que tendremos 02 valores de  $E_{Tc}$ , esto debido al balance hídrico evaluado con el tensiómetro y sensor Watermark.

Finalmente, el  $K_c$  del cultivo es la relación de la evapotranspiración del cultivo ( $E_{Tc}$ ) con la evapotranspiración del cultivo de referencia ( $E_{To}$ )  $k_c = E_{Tc}/E_{To}$ . Se procedió a calcular el coeficiente del cultivo  $K_c$  en el momento de realizado el balance hídrico; que fue de cada 2 días.

## **IV. RESULTADOS**

### **4.1 Características de agua y suelo**

#### **4.1.1 Análisis de agua**

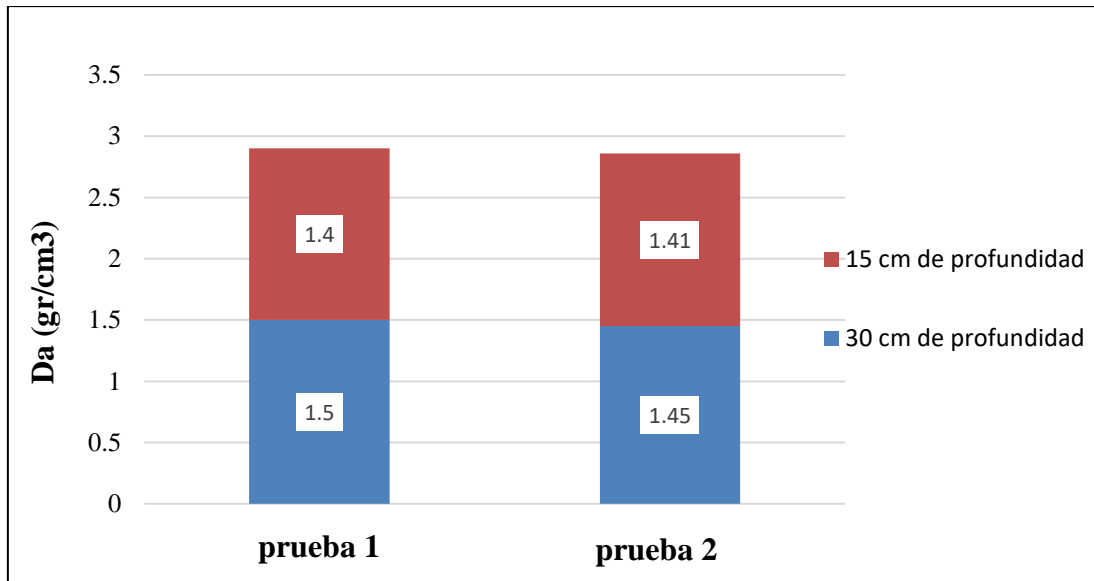
Inmediatamente iniciada la siembra y antes del primer riego, se realizó el análisis de agua con la finalidad de corroborar que el agua está dentro de los parámetros óptimos para el riego. En el anexo 05 se muestra los resultados y tiene como primera variable la conductividad eléctrica que es de 0.66 dS.m<sup>-1</sup>, que representa una salinidad moderada en una clasificación C2; luego tenemos un Ph de 7.52, el cual es ligeramente alcalino. Otra variable importante es el contenido de sodio que para su clasificación utiliza la relación de absorción de sodio (RAS), siendo este valor 0.52 y se encuentra dentro de la clasificación S1

En general el análisis del agua nos dio como resultado una clasificación C2 – S1 y según las normas de Riverside el agua está en condiciones favorables para su uso en riego.

#### **4.1.2 Características físicas del suelo**

##### **Densidad aparente (Da)**

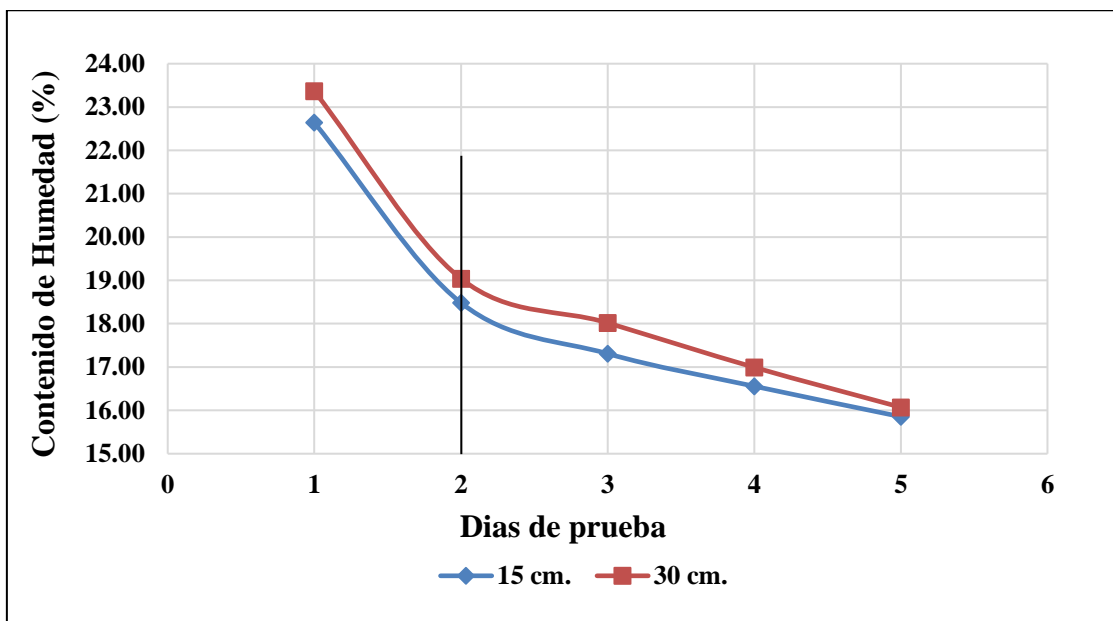
Fue necesario la realización de 2 pruebas, antes y después de la construcción del lisímetro, a fin de comparar y verificar alguna alteración significativa en este parámetro. El muestreo para determinar la densidad aparente se realizó antes y después de la construcción del lisímetro y los resultados se muestran en la figura 23 donde se detalla que prácticamente no hay variación entre la prueba 1 y la prueba 2; es más, se puede considerar para cada prueba que tampoco existe variación considerable de la densidad aparente a diferente profundidad. Los resultados a mayor detalle en el anexo 7.



**Figura 23: Densidad aparente del suelo**

### Capacidad de campo (CC)

Como se desprende en la figura 24 la capacidad de campo del suelo para una profundidad de 15cm es de 18.48 %, y para una profundidad de 30cm es de 19.04%. En ambos casos esta se presentó al segundo día de muestreo. Y como se muestra hay una gran similitud en los valores mostrados, esto debido al margen de distancia entre las profundidades de estudio. Los datos recolectados se muestran en el anexo 7.



**Figura 24: Contenido de humedad en el suelo**

### **Punto de marchitez permanente (PMP)**

Para la estimación de esta variable se consideró la ecuación de Silva (Silva et al., 1988), el cual se basa en la capacidad de campo para determinar el punto de marchitez. Los resultados fueron de 8.7% y 9.09% para 15 y 30 cm de profundidad respectivamente.

## **4.2 Condiciones ambientales**

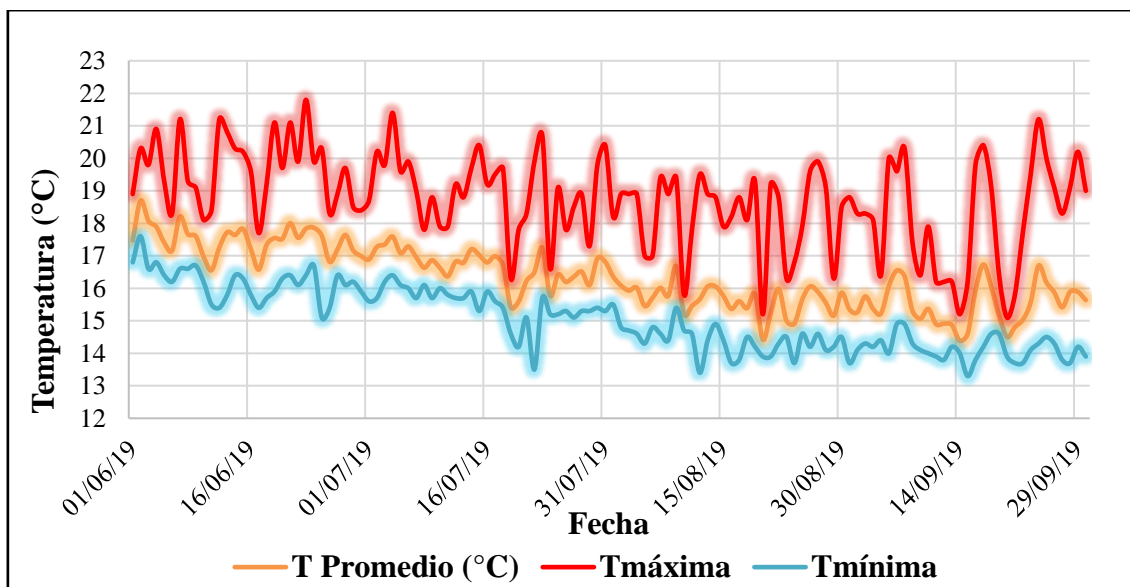
Es muy importante conocer las condiciones ambientales de la zona de estudio ya que estas influyen en el desarrollo fisiológico del cultivo y en la evapotranspiración de esta. Y es por ello, que se requirió los datos de la estación meteorológica de la FIA; estos datos pertenecen a los meses de junio, julio, agosto y setiembre; fechas donde se desarrolló la investigación. A continuación, se muestra las principales variables climáticas como: temperatura, humedad relativa, radiación solar y la velocidad del viento.

### **Temperatura**

Como se indica en la (figura 25) el inicio del desarrollo del cultivo se realizó cuando aún predominaba un clima cálido, luego esta termino su desarrollo y madurez en un clima más frío. Hecho que no interfiere en el buen rendimiento del cultivo. Las temperaturas máximas alcanzada fue al inicio del desarrollo del cultivo fue de 21.8°C y la temperatura mínima fue de 13.3°C ya en la etapa de maduración. Mientras que la diferencia entre la temperatura máxima y mínima (día-noche) fue de 7.2 °C.

La variable temperatura también nos permitirá obtener el ETo ya que tiene relación directa con el tanque evaporímetro y participa como variable para el cálculo de la presión de saturación (es.) y la radiación neta (Rn) en la obtención de la ETo mediante el método FAO Penman – Monteith.

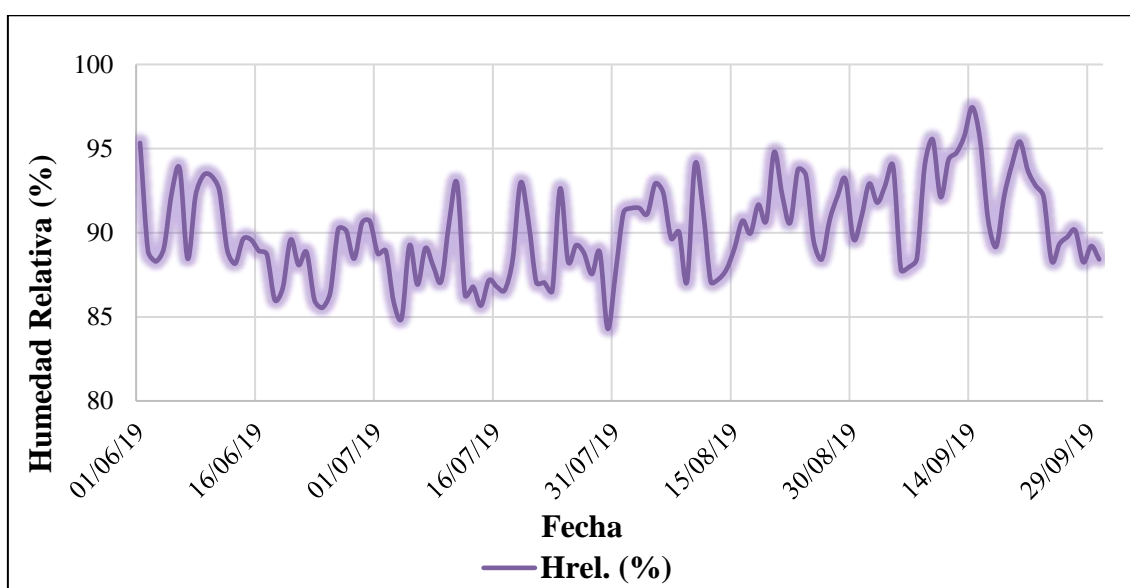




**Figura 25: Registro de la temperatura durante la investigación**

### Humedad relativa

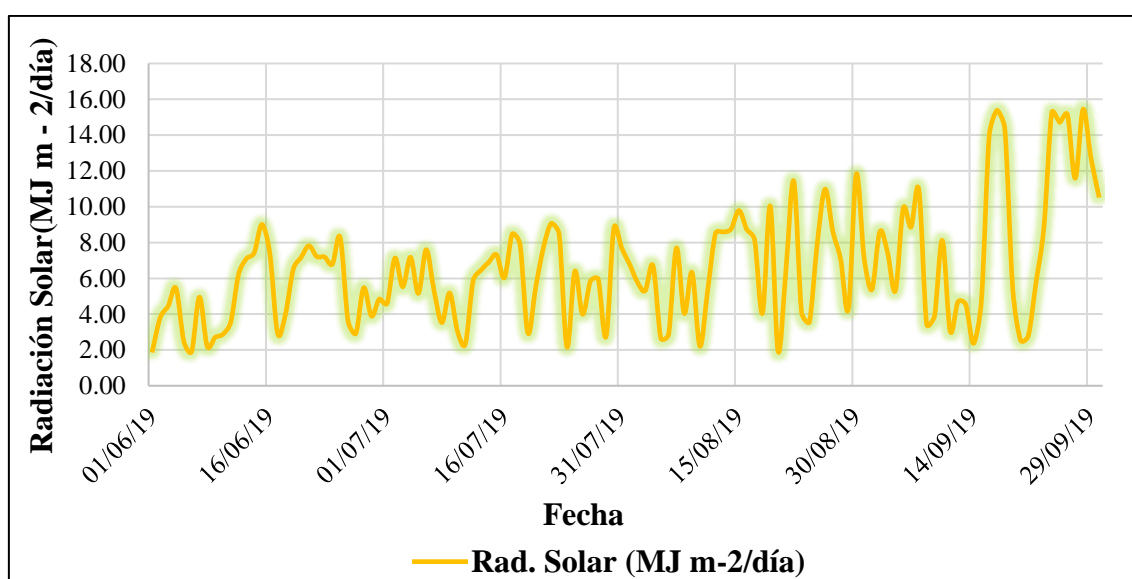
Con respecto a la (Figura 26), que muestra la variación de la humedad relativa durante el proceso de la investigación, este es contrario a la temperatura promedio siendo su valor más bajo en promedio/día de 84.2% y la más alta de 97.4%. Esto indica un contenido de humedad alto por lo que contribuye al aporte del requerimiento del cultivo y al hidratamiento de sus hojas. Esta variable también es necesaria para la obtención de la presión real (ea) variable participe en el cálculo de la ETo mediante Penman – Monteith



**Figura 26: Registro de la humedad relativa durante la investigación**

## Radiación solar

La radiación solar indicada en la (Figura 27), es la fuente más importante de energía ambiental y tiene relación prácticamente con todos los procesos fisiológicos del cultivo. Siendo la mínima y máxima de 1.9MJ m<sup>2</sup>/día y 15.44MJ m<sup>2</sup>/día. También esta variable es la que más influye en ya que cuenta con un valor numérico alto en la ecuación Penman – Monteith. Hecho que se ve reflejado en la similitud de tendencias en las figuras 27 y 29 respecto a la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>).

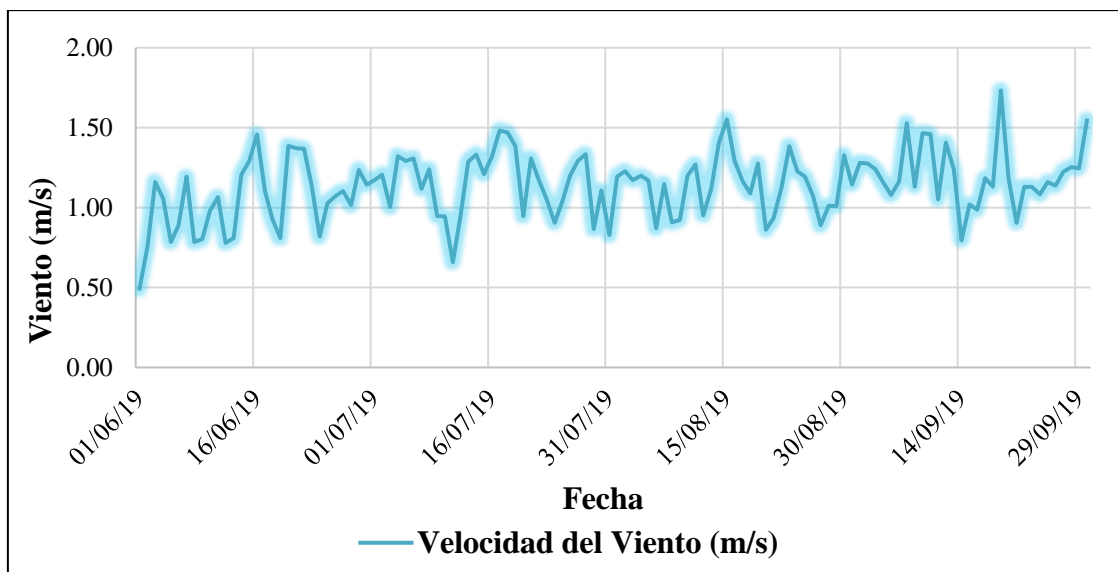


**Figura 27: Registro de la radiación solar durante la investigación**

## Velocidad de viento

Los datos mostrados en la (Figura 28) fueron previamente procesadas puesto que los valores recogidos en la estación Davis fueron tomados a una altura de 11.07 m sobre el suelo y para esta investigación se requirió valores de velocidad de viento a 2 m, hecho que llevo a realizar la corrección previa.

Por otra parte, el viento también influye en el cultivo ya que es un factor que provoca la rápida deshidratación de las plantas, además de reseca el suelo, condicionando así la hora del riego. También en una variable dividiendo para la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>).



**Figura 28: Registro de la velocidad del viento corregida a 2m. de altura**

#### 4.3 Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>)

Para determinar la evapotranspiración se realizó por dos métodos: por el tanque evaporímetro tipo A y por el método FAO Penman Monteith. También fue posible la obtención de esta variable de forma directa mediante la estación Davis ventage. La evapotranspiración de referencia calculada por el método de tanque clase “A” y teniendo en cuenta un factor de tanque de 0.85; sin embargo, este método indica mayor variación en sus registros los cuales se observan en la (Figura 29). Por otra parte, la determinación de esta variable por el método Penman - Monteith y estación Davis son las que más se asemejan puesto que la ET<sub>o</sub> calculada de forma directa por la estación se basa en la misma ecuación Penman – Monteith, como se ve representada en la (Figura 29). A continuación, en la (Tabla 15) se muestra datos promedio de la evapotranspiración/día durante el proceso del cultivo por diferentes métodos:

**Tabla 15: Resumen de la evapotranspiración promedio para diferentes métodos**

MES	TANQUE ET <sub>o</sub> _Promedio (mm/día)	ESTACION ET <sub>o</sub> _Promedio (mm/día)	PENMAN - MOTEITH ET <sub>o</sub> _Promedio (mm/día)
<b>Junio</b>	1.38	1.26	1.33
<b>Julio</b>	1.50	1.24	1.32
<b>Agosto</b>	1.23	1.20	1.34
<b>Setiembre</b>	1.36	1.23	1.29

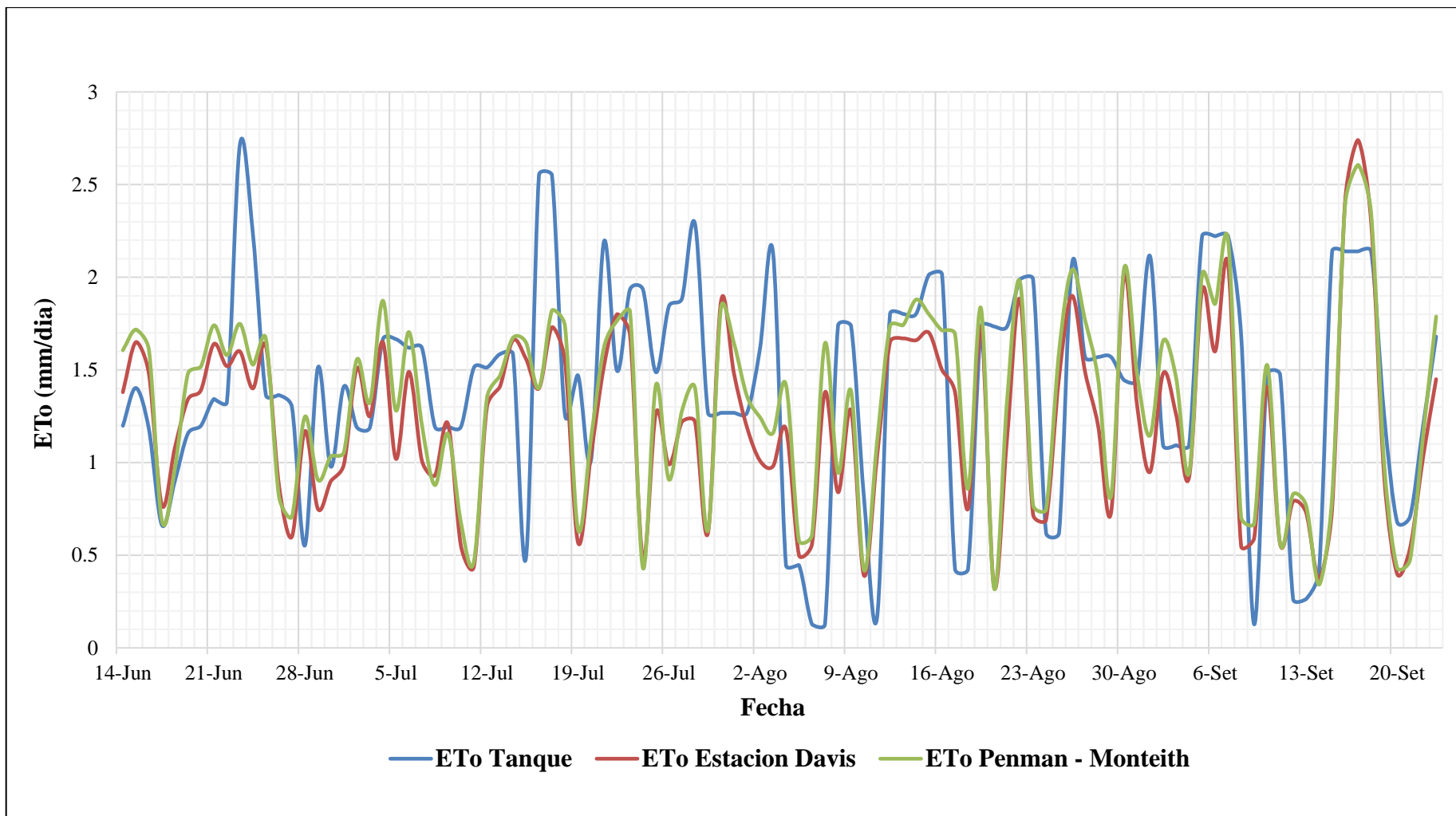


Figura 29: Evapotranspiración de referencia mediante tres métodos

## 4.4 Balance hídrico

### 4.4.1 Riego

En cuanto al riego aplicado al lisímetro, esta se realizó en función a la ETo y añadiéndole un factor de 1.5 como indica (Rodríguez, 2012); esto con la finalidad de incentivar el drenaje dentro del lisímetro. Previamente antes de iniciado la investigación se realizó un ensayo para determinar el coeficiente de uniformidad (CU) de los goteros la cual se indica a continuación:

#### Coefficiente de uniformidad

Esta prueba se realizó tanto en la parcela, que es donde está ubicado nuestro lisímetro y dentro del lisímetro y los datos obtenidos se muestran en el (anexo 8). Donde indica un coeficiente de uniformidad de 91%, el cual es relación entre el promedio de caudales mínimos del 25% de datos tomados entre el promedio total de caudales tomados. Ello con respecto a la parcela 4; Por otra parte, los valores obtenidos dentro del mismo lisímetro se muestran en la (Tabla 16), la cual tuvo un tiempo de prueba de 1min a una presión de trabajo de 1 bar y obteniéndose un caudal promedio mínimo del 25% del total de 43ml/min frente a un caudal promedio total de 46.3 ml/min, relación que nos da un coeficiente de uniformidad de 93%, teniendo en cuenta que se usó goteros autocompensados.

**Tabla 16: Datos requeridos para la determinación del C.U.**

<b>Tipo de gotero</b>	Gotero autocompensado marca katif - rojo
<b>Caudal</b>	2.3LPH
<b>Presión de trabajo</b>	1 bar.
<b>Caudal promedio mínimo del 25% del total</b>	43.0ml/min
<b>Caudal promedio total</b>	46.3ml/min
<b>CU</b>	93%

#### Volumen aplicado al lisímetro

Ya calculado el coeficiente de uniformidad de los goteros y sabiendo con exactitud el aporte promedio de cada gotero podremos saber así el volumen aplicado a nuestro lisímetro, variable imprescindible para realizar nuestro balance hídrico.

En la (Tabla 17) nos muestra un resumen de la lámina aplicada en milímetros (mm) durante cada semana considerándose un factor de 1.5 para incentivar drenaje y un CU de 0.93 que guarda relación completamente a la ETo del tanque, luego de determinada la lámina de riego se procedió a hallar el volumen en litros multiplicando por 1.2 m<sup>2</sup> que es el área del lisímetro y posteriormente al cálculo del tiempo de riego dividiéndole entre el número de gotero y el caudal de este.

El riego se realizó cada 2 días, tiempo en el que el suelo se encontró lo más cercano a capacidad de campo (CC) y para la determinación de esta variable se realizó mediante el uso del tensiómetro y sensor Watermark, previamente calibrado

**Tabla 17: Volumen de agua aplicado al lisímetro**

	<b>ETo Tanque Acumulado (mm.)</b>	<b>Lámina Aplicada (mm.)</b>	<b>Tiempo de Riego (min.)</b>
<b>semana 1</b>	7.30	11.77	61.43
<b>semana 2</b>	11.89	19.17	100.04
<b>semana 3</b>	8.33	13.44	70.10
<b>semana 4</b>	11.34	18.29	95.42
<b>semana 5</b>	8.19	13.21	68.92
<b>semana 6</b>	13.11	21.14	110.29
<b>semana 7</b>	10.58	17.07	89.04
<b>semana 8</b>	11.56	18.64	97.28
<b>semana 9</b>	4.99	8.04	41.95
<b>semana 10</b>	10.45	16.85	87.91
<b>semana 11</b>	9.70	15.65	81.63
<b>semana 12</b>	12.41	20.01	104.41
<b>semana 13</b>	9.95	16.04	83.69
<b>semana 14</b>	7.85	12.66	66.07
<b>semana 15</b>	9.07	14.63	76.31

#### **4.4.2 Precipitación**

En el (anexo 10) se observa los datos recopilados en cuanto a la precipitación. También en la (Tabla 18) se muestra en forma resumida por semanas, donde indica que durante la investigación la precipitación fue baja, siendo durante la semana 10, semana 11, semana 13, semana 14 correspondientes a los meses de agosto y setiembre donde se presentaron precipitación promedio de 0.5mm/mes. El total de la precipitación durante la investigación fue de 1.25mm.

#### **4.4.3 Agua drenada**

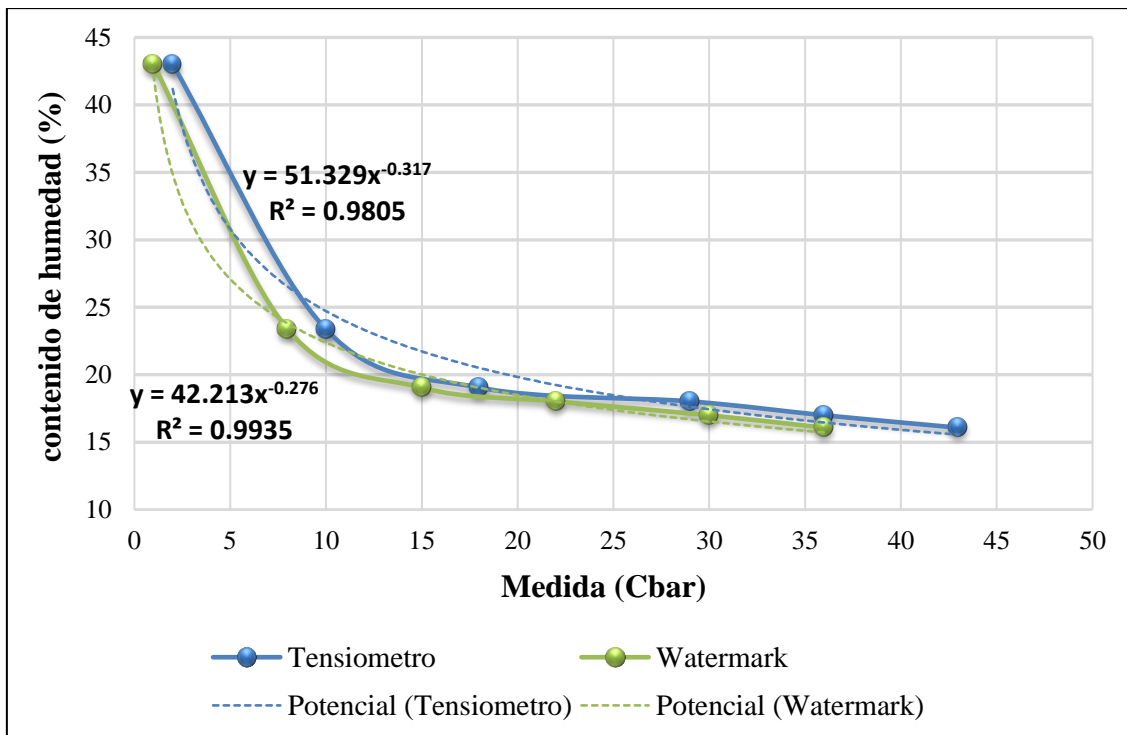
El drenaje durante la investigación guarda relación con la ETc y la ETo y obviamente con las características hídricas del suelo, siendo el drenaje de mayor volumen durante las primeras semanas de la investigación como indica la (Tabla 18). El drenaje total acumulados expresado en milímetros fue de 132.18mm correspondiente desarrollo de la investigación.

#### **4.4.4 Variación de humedad en el suelo**

La variación de la humedad forma parte del balance hídrico y es muy importante hacer mención puesto que condiciona al riego, ya que la frecuencia de riego se realizó en función a las características hídricas del suelo en este caso cuando este se encontraba lo más cercano a capacidad de campo (CC) y por lo general la capacidad de campo se dio a los 2 días después de realizado la saturación (riego). Mencionado en la (Figura 24).

Sin embargo, no siempre a los 2 días lograremos encontrar el mismo porcentaje de contenido de humedad gravimétrico establecido como nuestra capacidad de campo, puesto que hay variaciones de humedad en el suelo; por ello, fue necesario la toma de lecturas antes de realizar el riego y esta se realizó mediante el tensiómetro y sensor Watermark, a una profundidad de 30cm, las lecturas fueron obtenidas en Cb (centibares); luego mediante la curva de calibración previamente realizada. (Figura 30) fue convertido a contenido de humedad; luego y teniendo como base el contenido de humedad de 19.04% que se estableció como la capacidad de campo a 30cm. (Figura 24). Se obtuvo la variación de humedad pudiendo ser positiva si el contenido de humedad fue superior a la establecida como capacidad de campo y negativa si el contenido de humedad fue inferior a la establecida como capacidad de campo.

Para pasar la variación % de humedad a lámina de riego fue necesario tener datos como densidad aparente, profundidad de la lectura toma (30cm) y área del lisímetro. En el (anexo 9) se muestra los datos recolectados para la calibración de los sensores.



**Figura 30: Curva de calibración del sensor Watermark y Tensiómetro**

#### 4.5 Evapotranspiración del cultivo real (ETc)

Una vez obtenido las variables de riego, precipitación y agua drenada y variación de humedad se pudo realizar el cálculo de la evapotranspiración real de cultivo (ETc) mediante el balance hídrico, el cual a modo de resumen se presenta en la (Tabla 18) y de manera completa en el (anexo 10). La ETc, el cual representa el requerimiento hídrico del cultivo para las condiciones climáticas y de suelos en donde se aplicó la investigación, varía de forma ascendente durante su periodo vegetativo de 105 días; siendo las 4 primeras semanas las de menor requerimiento hídrico con un valor de la ETc en función al tensiómetro y sensor Watermark de 19.16mm y 20.55 respectivamente y las de mayor requerimiento hídrico durante las semanas 10, 11, 12 y 13 con un valor de ETc en función al tensiómetro y sensor Watermark de 43.81mm. y 45.07 respectivamente

La ETc total requerida en función al tensiómetro y sensor Watermark fue de 110.68mm y 113.40 respectivamente los cuales representa un requerimiento hídrico de cultivo por debajo del promedio esto debido a la variedad precoz, suelo y principalmente a las condiciones climáticas.



**Tabla 18: Resultados semanales de la Evapotranspiración del cultivo de papa**

	lamina de riego (mm.)	Drenaje (mm.)	Precipitación (mm.)	Variación de Humedad		ETc	
				Tensiómetro (mm.)	Watermark (mm.)	Tensiómetro (mm.)	Watermark (mm.)
<b>semana 1</b>	11.77	9.40	0.00	-0.39	-0.77	3.07	3.44
<b>semana 2</b>	19.17	12.62	0.00	1.90	1.03	4.95	5.82
<b>semana 3</b>	13.44	8.97	0.00	0.65	0.84	4.12	3.93
<b>semana 4</b>	18.29	11.00	0.00	0.57	0.23	7.02	7.36
<b>semana 5</b>	13.21	8.98	0.00	0.01	-0.07	4.52	4.60
<b>semana 6</b>	21.14	12.56	0.00	-0.34	-0.01	9.22	8.89
<b>semana 7</b>	17.07	9.45	0.00	0.83	0.72	7.09	7.20
<b>semana 8</b>	18.64	13.29	0.00	-0.54	-0.29	6.20	5.95
<b>semana 9</b>	8.04	3.18	0.00	-1.28	-1.36	6.44	6.52
<b>semana 10</b>	16.85	7.44	0.25	-1.52	-2.22	11.48	12.18
<b>semana 11</b>	15.65	5.80	0.25	0.32	-0.30	10.08	10.69
<b>semana 12</b>	20.01	6.92	0.00	-0.37	-0.29	13.77	13.69
<b>semana 13</b>	16.04	8.39	0.25	-0.28	-0.31	8.48	8.51
<b>semana 14</b>	12.66	5.53	0.50	-0.24	-0.33	8.17	8.26
<b>semana 15</b>	14.63	8.66	0.00	0.19	-0.08	6.08	6.35
<b>TOTAL</b>						<b>110.68</b>	<b>113.40</b>

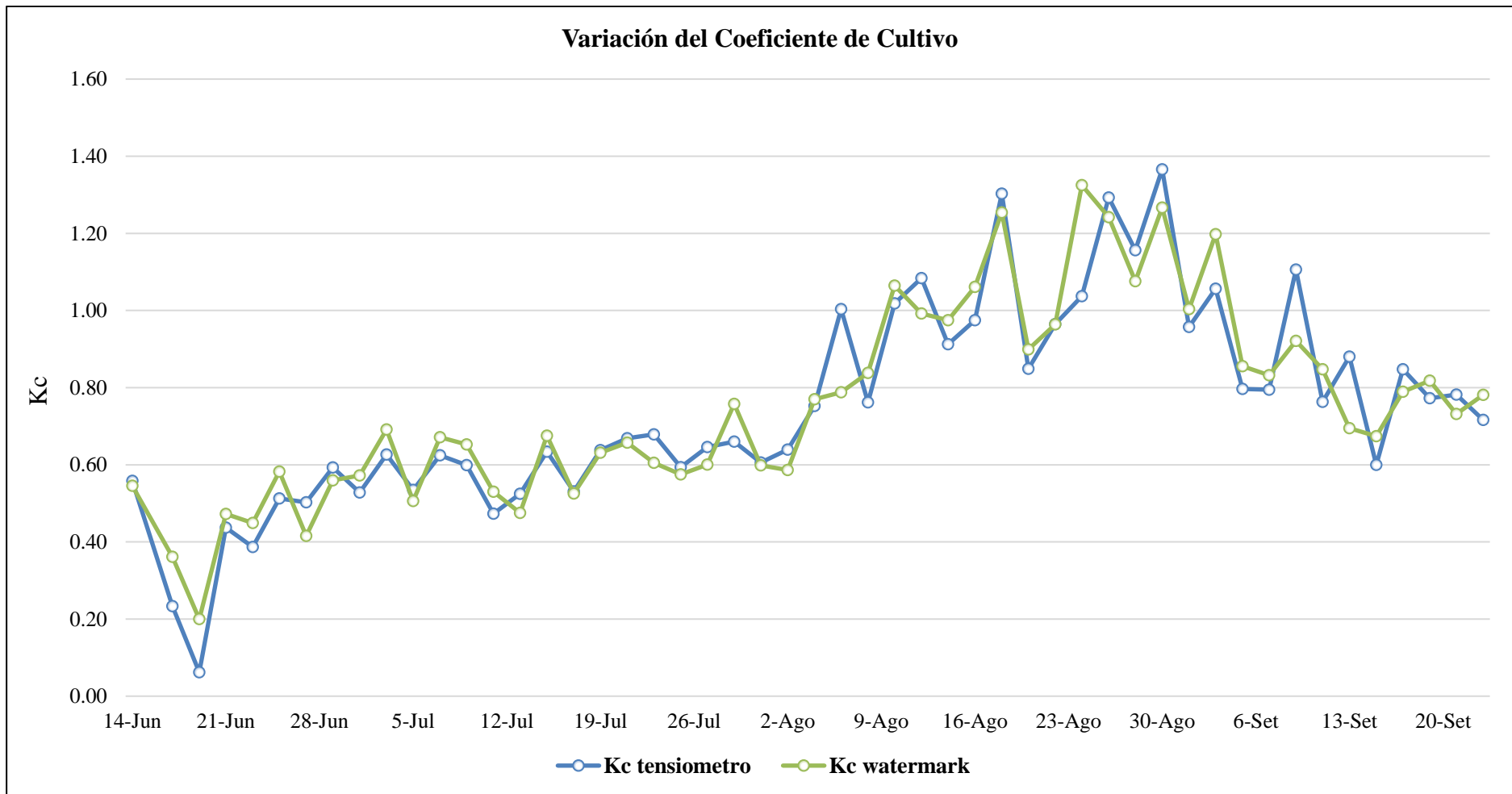
#### 4.6 Determinación del coeficiente de cultivo (Kc)

Como ya se mencionó el coeficiente de cultivo es la relación entre la evapotranspiración real (ETc) y la evapotranspiración de referencia (ETo). La ETo lo hemos determinado de forma directa por el método del tanque tipo A, por la estación Davis ventage y por la fórmula de Penman Monteith, entonces como resultado obtuvimos 3 variables de ETo, utilizando para esta investigación el obtenido mediante el tanque tipo A por ser una variable obtenida de forma directa. Los valores de Kc obtenidos para las diferentes etapas fenológicas durante todo el período vegetativo varían de acuerdo con el desarrollo del cultivo, como se muestra resumido en la (Tabla 19). En cuanto al Kc determinado en función al tensiómetro tenemos que el valor máximo alcanzado fue en la fase III con un Kc de 1.12, lo cual ocurrió en la semana 12; por otra parte, el Kc obtenido en función a sensor Watermark fue de 1.18, también alcanzado en la semana 12.

En la (Figura 31) se muestra la variación del Kc, en función al tensiómetro y el sensor Watermark donde se evidencia una notoria relación y estrecha similitud entre el kc obtenido utilizando el tensiómetro y en kc obtenido utilizando en sensor Watermark.

**Tabla 19: Coeficiente del cultivo (Kc) de la papa por fases fenológicas**

FASES	N° de semana	Coeficiente de Cultivo	
		Tensiómetro	Watermark
FASE I	1	0.40	0.45
	2	0.35	0.43
	3	0.54	0.52
	4	0.60	0.63
FASE II	5	0.54	0.56
	6	0.63	0.65
	7	0.63	0.64
	8	0.75	0.72
FASE III	9	1.15	0.99
	10	1.01	1.16
	11	1.10	1.30
	12	1.15	1.19
FASE IV	13	0.90	0.87
	14	0.77	0.75
	15	0.76	0.78



**Figura 31: Variación del coeficiente de cultivo de la papa**

### Curva de coeficiente de cultivo bajo el esquema fao

En la (Figura 32) se muestra los valores promedio obtenidos del coeficiente de cultivo en función a la relación de la  $ET_c$ , obtenido mediante el tensiómetro y sensor Watermark, y la  $ET_o$  del tanque; graficándose así la curva de  $K_c$  según la metodología propuesta por la FAO, la cual propone la variación del coeficiente de cultivo en función a las fases del cultivo siendo estas propuestas la fase inicial, fase de desarrollo, fase media y la fase final. El manual 24 de la FAO indica la duración aproximada en días de las fases en el periodo vegetativo de una variedad precoz del cultivo de papa, siendo estas descrita de la siguiente manera; la fase inicial abarca 25 días, la fase de desarrollo unos 30 días, la fase media unos 30 y la fase final unos 20 días haciendo una suma total de 105 días, periodo vegetativo de nuestro cultivo en investigación. Cabe resaltar que estos tiempos descritos es una manera aproximada de clasificar las fases del cultivo.

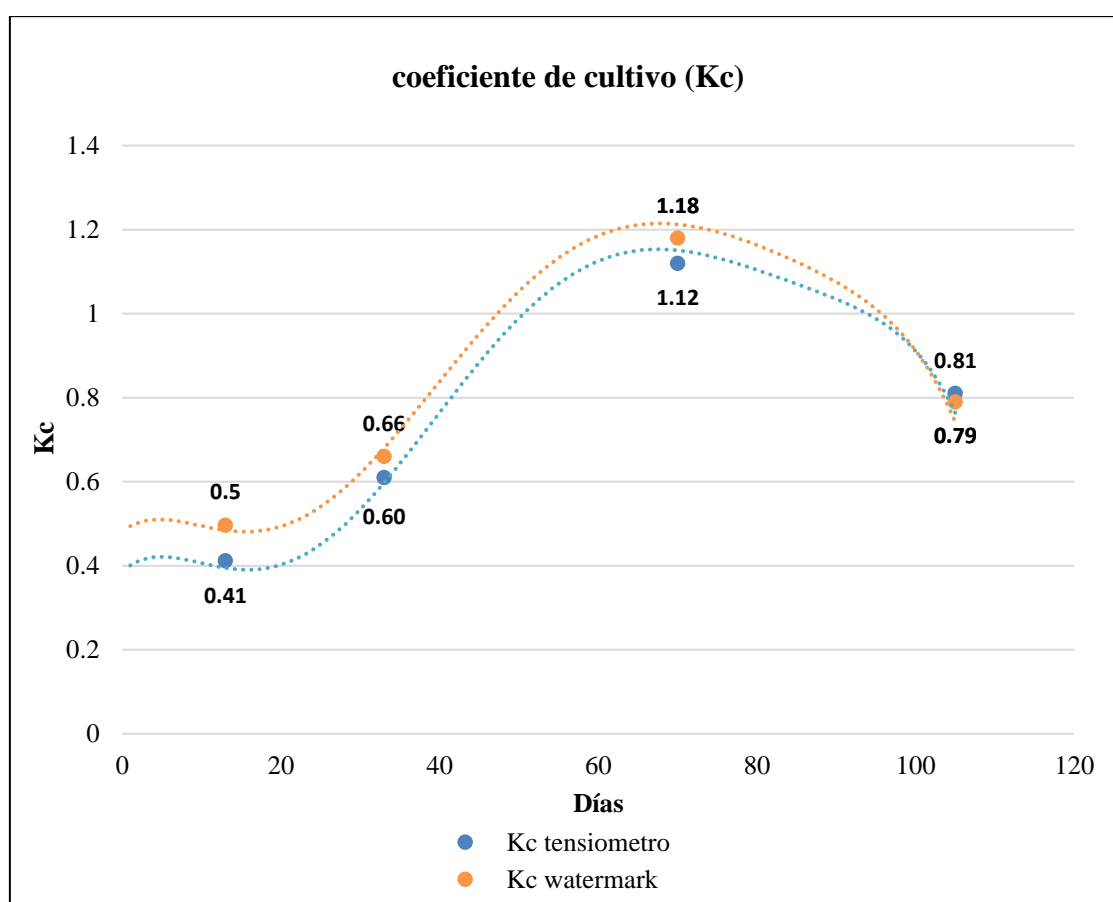


Figura 32: Curva de coeficiente de cultivo según la metodología FAO

### Comparación entre el kc determinado y el propuesto por la FAO

Anteriormente la información respecto al coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) era tomada de la literatura existente para tal fin. Como es el manual 24 de la FAO, pero este valor no siempre reflejaba las condiciones edafoclimáticas propios de la zona del sembrío; sin embargo, se usa como referente al momento de realizar el diseño agronómico. (En la figura 33) se muestra el resultado final del coeficiente de cultivo promedios estimados por cada fase fenológica, a su vez también se muestra los valores de  $K_c$  estimados por la FAO, donde se aprecia una variación significativa en sus valores en la etapa inicial, disminuyendo esta variación en la etapa de desarrollo. Ya en la etapa media y final los valores de  $k_c$  determinados se asemejan al valor de  $k_c$  dado por la FAO. Cabe resaltar que la gráfica presentada en la (figura 33) está en función al esquema fao, lo cual se realizó utilizando los valores promedios de  $k_c$  de cada fase fenológica. Para más información del comportamiento real de coeficiente de cultivos durante todo el proceso productivo véase (anexo 10)

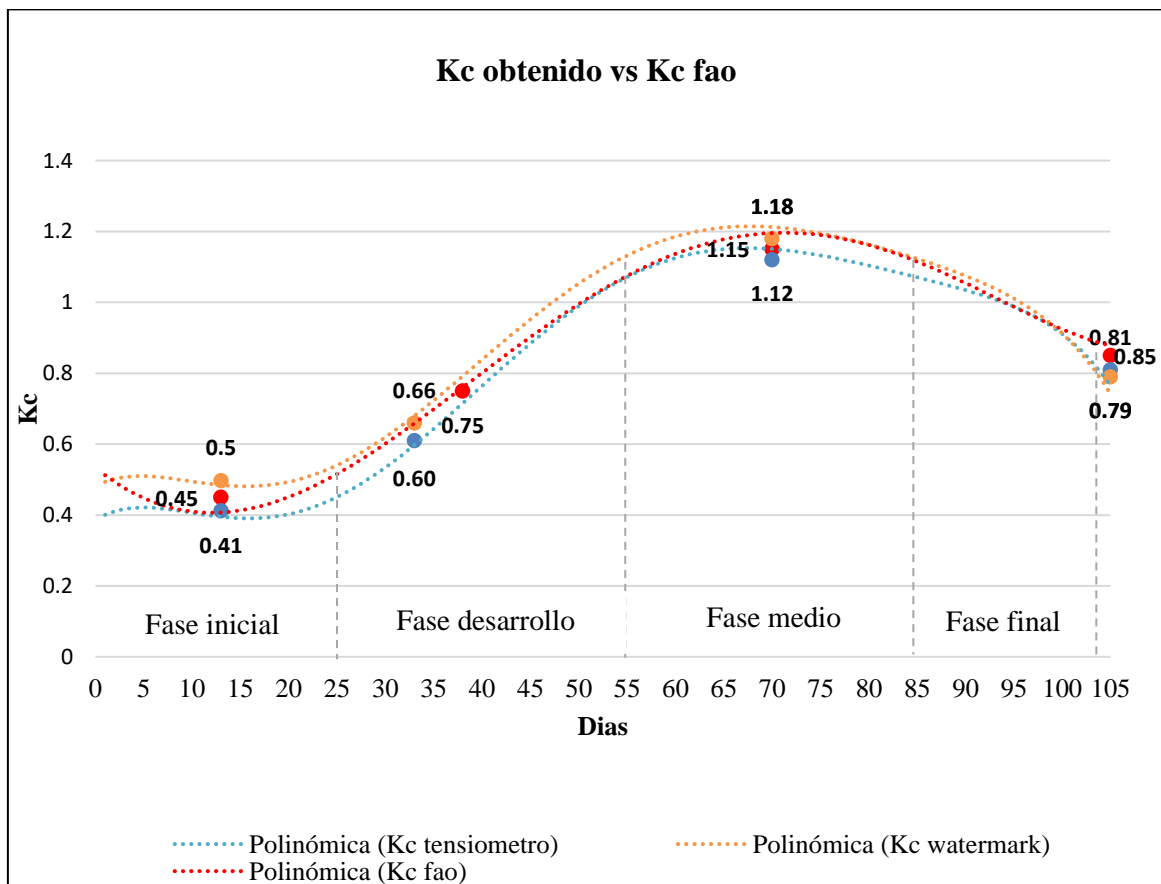


Figura 33: Comparación  $K_c$  fao con  $K_c$  determinado en la investigación

## 4.7 Otros resultados

### 4.7.1 Parámetros biométricos

#### Altura de planta

En la (figura 34) se muestra el promedio de las alturas de la planta para sus diferentes etapas fenológicas y se muestra los datos al final e inicio de cada fase. La altura máxima alcanzada se dio al final de la fase IV y fue de 111,1 cm; por otra parte, Gutiérrez (2007), indica que las plantas de la variedad UNICA alcanzan una altura máxima de 120 cm. En el (anexo 12) se detalla una breve comparación en cuanto a altura de la planta basándose en un coeficiente de cultivo diferente.

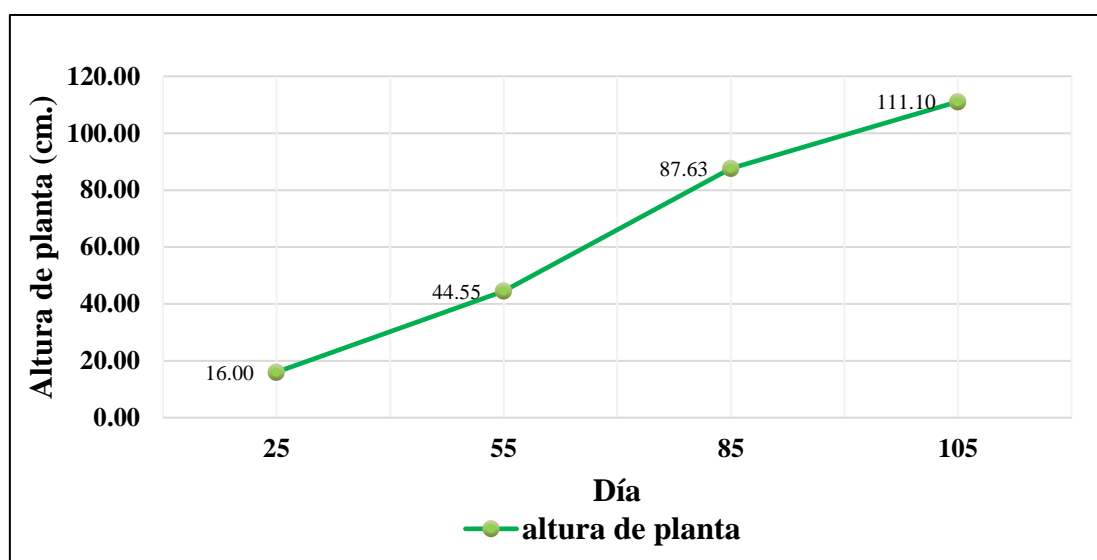


Figura 34: Altura de planta en el Lisímetro

#### Numero de tallos principales

El conteo de números de tallos se realizó antes del aporque y antes de el corte del follaje, para su posterior cosecha. Como se observa en la (tabla 20) el número de tallos disminuyo, esto debido a que la planta alcanza la madurez y por consiguiente las hojas inferiores se amarillan y el follaje se tumba.

Tabla 20: Número de tallos principales en el cultivo

	Antes aporque (30 días)	Antes cosecha (> 105 días)
Numero de tallos	5.25	5.00

## Rendimiento del cultivo

El análisis en cuanto al rendimiento del cultivo se desarrolló por cada planta ubicada dentro del lisímetro y los resultados a analizar son: el número de tubérculos por plantas y calibres (ver tabla 14) y el peso, también por plantas y calibres. A continuación, se muestra los resultados mencionados en la (figura 35) y (figura 36).

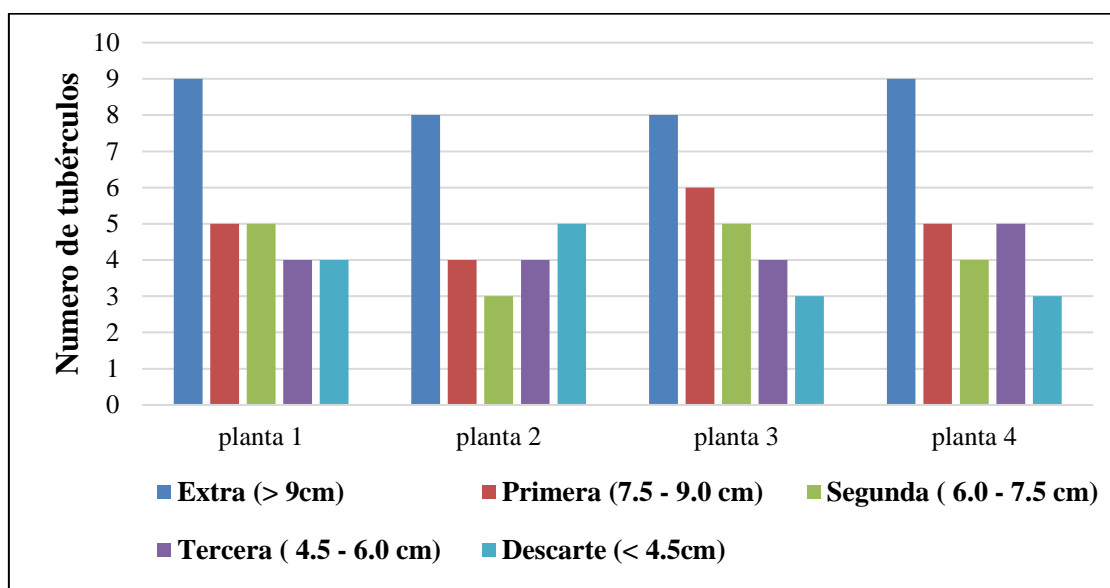


Figura 35: Numero de tubérculos por planta

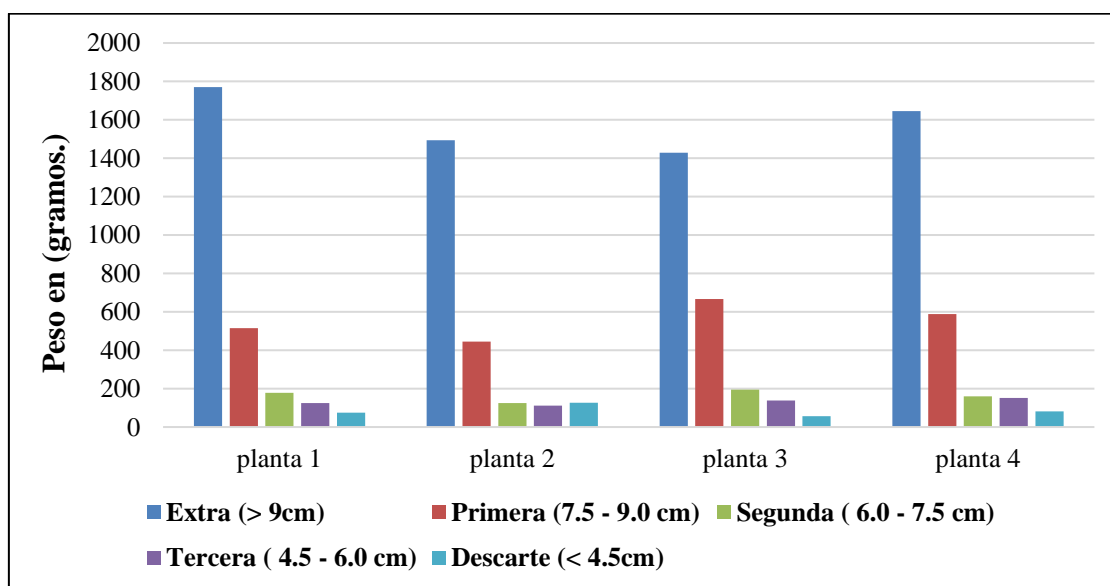


Figura 36: Peso del tubérculo por planta

Cómo se observa en las gráficas anteriores el predominio en cuanto al tamaño y la producción por parte del calibre extra, el cual prácticamente abarca el 50% de la producción total. Ahora el peso promedio del total de plantación en el lisímetro fue de 2.519kg por planta y se traduce así un rendimiento de 62.90 kg/ha valor relativamente alto en comparación a lo expuesto por Nunes (2016) el cual obtuvo un rendimiento promedio de 45tn/ha.



## V. CONCLUSIONES

Los valores de coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) de la papa (*Solanum tuberosum*) variedad Unica de fueron determinados usando los datos de evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) y la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ), utilizando el tanque tipo A. 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 = 0.66, una fase estable de mediados de temporada  $K_c$  medio = 1.18 y una fase final de senescencia con descenso en el consumo de agua  $K_c$  final = 0.79 teniendo al final un promedio ponderado de  $K_c$  de 0.8.

La evapotranspiración de cultivo “ $ET_c$ ” se estimó mediante el balance hídrico en los cuales se consideró las variables de riego, precipitación y drenaje. Siendo el requerimiento hídrico total de 1111.18 m<sup>3</sup>/ha para el periodo vegetativo de 105 días el cual se desarrolló durante los meses de junio hasta setiembre.

La evapotranspiración de referencia promedio fue de 1.45 mm/día y se obtuvo mediante el tanque tipo A y a partir de las fórmulas empíricas, Penman-Monteith, basadas en datos meteorológicos de la estación Davis ventage; sin embargo, para la estimación final del  $ET_o$  se utilizó el obtenido mediante el tanque evaporímetro tipo A, el cual está en interacción completa con el ambiente y nos brinda el valor directamente. El valor de  $ET_o$  obtenido a partir de la estación puede presentar variaciones que probablemente se deben a las variables que intervienen en los cálculos y a la sensibilidad de sus sensores operando loas variables climáticas predominantes de la zona (temperatura, humedad relativa, precipitación y horas de insolación).

El mejor método para determinar el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) de la papa (*Solanum tuberosum*) variedad Unica bajo condiciones edafoclimáticas de la Molina – Lima, es el lisímetro de drenaje, ya que proporciona información directa del total de agua requerida pues considera la relación agua, suelo, planta y atmosfera. Además de presentar

componentes sencillos y económicos para su fabricación, también en cuanto a manejo y confiabilidad; esto frente a un lisímetro de pesada, el cual puede llegar a costar 100% más y se requiere constante calibración y un manejo exhaustivo en cuanto a la toma de datos.

En cuanto a sus parámetros biométricos del cultivo papa dentro del lisímetro, esta tuvo una altura de planta máxima de 111.10 cm, número de tallos 5; respecto al rendimiento total esta fue de 62.9 tn/ha, además se clasificó (tabla 14) en extra, primera, segunda, tercera y descarte los cuales presentaron las cantidades promedio de 8.5, 5, 4.25, 4.25 y 4 respectivamente. También en el (anexo 12) fue posible presentar datos obtenidos de parámetros biométricos de la misma variedad, cultivado en paralelo, pero bajo otra dosificación hídrica, ósea diferente kc (determinado por Autodema) y los resultados obtenidos en cuanto a altura fue de 101.75cm y tuvo un rendimiento total de 66 tn/ha presentados así valores similares en cuanto al Kc determinado con el lisímetro y el Kc determinado por Autodema.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- Es necesario realizar estudios similares durante todo el año y en los diferentes pisos ecológicos de nuestra región, a fin de obtener una mayor información sobre la evapotranspiración de referencia y evapotranspiración real de cualquier cultivo en nuestro país.
- Validar los resultados del coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) de la papa (*Solanum tuberosum*) bajo las condiciones edafoclimáticas de La Molina - Lima, empleando al menos 3 lisímetros de lisímetros con la finalidad eliminar cualquier variación que pudiese presentar a así seguir ajustando y optimizando el buen uso y aplicación del agua de riego.
- Realizar comparaciones del lisímetro de un drenaje y un lisímetro de pesada, considerando las mismas condiciones edafoclimáticas.
- Difundir los resultados de esta investigación a los agentes del agro de la región costera de Lima

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, G. R.; Pereira, L.; Raes, D.; Smith, M. 2006. Estudio FAO Riego y drenaje 56. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Serie Cuadernos Técnicos. Roma, Italia. FAO. 298 p.

ANA (Autoridad Nacional del Agua). 2017. Agencia Agraria de Noticias. Lima, Perú. Disponible en:

<http://agraria.pe/noticias/80-del-agua-en-peru-se-destina-a-la-agricultura-urge-13448>

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.

Cáceres, L. 2017, “Determinación Del Coeficiente (Kc) Para El Cultivo De Páprika (*Capsicum annuum* L.) var. “Papri Queen” Bajo Condiciones De La Irrigación Majes”. Arequipa, Perú.

Canllahui M. 2013. “Determinación de la Evapotranspiración y Coeficiente de Cultivo (kc) en la Producción de papa (*solanum tuberosum* l.) var. silver en el cip-illpa-puno”. Tesis Ing. Agro. Puno, Perú, UNA. 124p. disponible en:

[http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/3576/Canllahui\\_Mamani\\_Marina.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/3576/Canllahui_Mamani_Marina.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Catálogo de sensores de humedad Irrometer Company. 2012.

Egúsqüiza Bayona, RP. 2014. La papa en el Perú. 2014. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. 200 p

Enciso, E. 2005. Sensores de Humedad del Riego para eficientizar el riego. Cooperativa de Texas. Pag. 2 – 6.

FAO. 2006. Evapotranspiración del Cultivo, Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, Estudio FAO Riego y Drenaje.15 pág.

García, VJ. 1992. Agrometeorología. Editorial E. Martell. Lima, Perú. 176 p.

Grillo, M. 1971. Determinación de la evapotranspiración con lisímetros. Universidad nacional de Colombia, Colombia. 196p. Disponible en:

[https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta\\_agronomica/article/download/48527/49738](https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/download/48527/49738)

Gutiérrez, J; Espinoza, M. 2007. UNICA: variedad peruana para mercado fresco y papa frita con tolerancia y resistencia para condiciones climáticas adversas. Revista Latinoamericana de la Papa. Mar del Plata, Argentina. 14(1): 41-51. Consultado 02 de agosto del 2017. Disponible en:

<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5512141.pdf>

Hargreaves, H.G. 1975. Manual de requerimiento de agua para los cultivos bajo riego y la agricultura bajo secano. AID, de los EE. UU de Norte América. 37p.

Honorato R. S.F. Manual de Edafología. 4ta Edición. Editorial Alfa y omega. México, D.F. 267 pág.

Hurtado, L. 2002. Fundamentos del riego: documento electrónico. Disponible en: [http://agricola-unl.com/pdf/Fundamentos\\_Riego.pdf](http://agricola-unl.com/pdf/Fundamentos_Riego.pdf) 58.

Israelsen, H. 1985, “Principios y Aplicaciones del Riego”; Editorial Reverté S.A., Barcelona – España; “2ª edición; traducido por el Agrónomo García Palacios A. / 397 pág.

Israelsen, H. 1985. Principios y Aplicaciones del Riego. Editorial Reverté S.A. Barcelona, España. 397 pág.

Kafkafi, U; Tarchitzky, J. 2012. Fertirrigación: una herramienta para una eficiente fertilización y manejo del agua. Melgar, R (trad). Asociación Internacional de la 71 Industria de Fertilizantes (IFA) Instituto Internacional de la Potasa (IIP), París, Francia. 80 p. Disponible en:

[https://www.ipipotash.org/udocs/391-2012\\_ifa\\_ipi\\_fertirrigacion.pdf](https://www.ipipotash.org/udocs/391-2012_ifa_ipi_fertirrigacion.pdf)

Lazo Perez CJ. 2006. Tecnología para el Riego. Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica CONCYTEC. Lima, Perú. 235 pág.

León Ruiz, JE. 2016. Modelación matemática para estimar los requerimientos hídricos del cultivo de papa (*solanum spp.*) en Riobamba – Ecuador. Tesis Dr. Lima, Perú, UNALM. 95 p. disponible en:

<http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2833>

MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego). 2017. Día nacional de la papa. Cadena agro-productiva. Lima, Perú. 2p. disponible en:

<https://www.minagri.gob.pe/portal/especial-iv-cenagro/25-sector-agrario/papa/207-papa>

Núñez Vargas, P. 2016. Fuentes y dosis de fertilización potásica en el crecimiento, tuberización y calidad de fritura de la papa (*Solanum tuberosum L.*) variedad UNICA. Tesis Ing. Agr. Lima, Perú, UNALM. 95 p. disponible en:

<http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/1979/F04-N864>

[T.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/1979/F04-N864/T.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Pacheco, J. y Alonso, N. 1995. Riego y Drenaje, 3ª Ed. S.I. 414 p.

Padilla J. 2016. Coeficiente de cultivo para el césped americano (*stenotaphrum secundatum*) utilizando lisímetros de drenaje. Tesis Ing. Agri. Lima, Perú, UNALM. 159p. disponible en:

<http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2483/P11-P3->

[T.pdf?sequence=3&isAllowed=y](http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2483/P11-P3-T.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

Palomino Velasquez K. 2009. Riego por Aspersión. 1 ed. Lima, Perú: J.A.C. 34, 35 p.

PSI (Programa Subsectorial de Irrigaciones). 2016. La eficiencia del uso de agua en el cultivo de la papa. Lima, Perú. 36p. disponible en:  
<http://www.psi.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/Eficiencia-del-Uso-del-Agua-en-el-Cultivo-de-la-papa.pdf>

Rodríguez, E. 2012. Uso de lisímetros de drenaje artesanales para determinar el Kc de los principales estados fenológicos de la uva de mesa cv. Thompson Seedless en el valle de Aconcagua. Tesis Ing. Agrónomo, Aconcagua, Chile. Corporación Universidad de Aconcagua. 26-27 P. Disponible en:  
<https://es.scribd.com/document/316347261/Usos-Lisimetros-Drenaje-Artesanales-Determinar-Kc-Principales-Estados-Fenologicos-Uva>

Rojas, L. sf. Guía de manejo nutrición vegetal de especialidad papa. CropKit. SQMF. pág. 17.

Santa Olalla, M. F. 2005. Agua y Agronomía. Editorial Mundi Prensa. España. 600 pág.

Silva, M. 1978. Evapotranspiración en el cultivo de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.). En: Resúmenes de investigaciones en quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) de la Universidad Nacional del Altiplano, 1962-1999.

Mujica, J. Aguilar y Sven-Erik Jacobsen, 1999. Editores. Puno, Perú. 209.

Vasquez, V.A. y L.Chang-Navarro,L. 1992. El Riego, principios básicos. Lima, Perú. P103-160

Vásquez, VA; Vásquez, RI. Y Vílchez, OG. (S.f.). Principios Básicos del Riego. Lima, Perú. Impreso en los Talleres Gráficos de FIMART S.A.C. 263 pág.

## VIII. ANEXOS

### Anexo 1: Materiales usados en la construcción del lisímetro

	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio Parcial</b>	<b>Precio Total</b>	<b>Proveedor</b>
<b>1</b>	<b>ZONA DEL LISÍMETRO</b>					
1.1	Tanque contenedor cuadrado de 1000L.	1	und	S/ 250.00	S/ 250.00	MULTIENVASES INDUSTRIALES "ALVARO"
1.2	Bolsa de cemento tipo I	1	und	S/ 21.00	S/ 21.00	FERRETERÍA "SANTA LUCIA"
1.3	Hormigón (arena gruesa)	1/2	m3	S/ 38.00	S/ 19.00	FERRETERÍA "SANTA LUCIA"
1.4	Piedra chancada 15mm	1/4	m3	S/ 55.00	S/ 14.00	FERRETERÍA "SANTA LUCIA"
1.5	Piedra chancada 2mm	1/4	m3	S/ 60.00	S/ 15.00	FERRETERÍA "SANTA LUCIA"
1.6	Arena fina	1/4	m3	S/ 40.00	S/ 10.00	FERRETERÍA "SANTA LUCIA"
1.7	Tubería de 2" pvc - clase 10	1	und	S/ 25.00	S/ 25.00	FERRETERÍA "SANTA LUCIA"
1.8	Tubo de 3/4 " clase 10	1	und	S/ 18.00	S/ 18.00	FERRETERÍA "SANTA LUCIA"
1.9	Te de 2"	5	und	S/ 4.50	S/ 22.50	FERRETERÍA "SANTA LUCIA"
1.10	Unión roscada de 2"	1	und	S/ 5.00	S/ 5.00	FERRETERÍA "SANTA LUCIA"
1.11	adaptador upr de 2"	1	und	S/ 4.00	S/ 4.00	FERRETERÍA "SANTA LUCIA"



Continuación...

1.12	Reducción 2" a 3/4" para salida de agua	1	und	S/ 6.00	S/ 6.00	FERRETERÍA "SANTA LUCIA"
1.13	Válvula metálica de 3/4"	1	und	S/ 15.00	S/ 15.00	FERRETERÍA "SANTA LUCIA"
1.14	Pegamento azul Qatey 8 oz	1	lata	S/ 16.00	S/ 16.00	FERRETERÍA "SANTA LUCIA"
1.15	Teflón	3	und	S/ 2.00	S/ 6.00	FERRETERÍA "SANTA LUCIA"
1.16	Pegamento sikaflet 11FC	1	und	S/ 18.00	S/ 18.00	FERRETERÍA "SANTA LUCIA"
1.17	Flete	1	und	S/ 100.00	S/ 100.00	TRANSPORTE PRIVADO
<b>2</b>	<b>ZONA DE RECOLECCIÓN</b>					
2.1	Viga de madera de 2"x3"x6m	3	und	sin costo	sin costo	UNALM
2.2	Tablas de 1cmx50cmx4m	3	und	sin costo	sin costo	UNALM
2.3	Malla raschell 90%	4	m2	S/ 8.00	S/ 32.00	FERRETERÍA "SANTA LUCIA"
2.4	Galonera de 20L.	1	und	S/ 15.00	S/ 15.00	FERRETERÍA "SANTA LUCIA"
2.5	Clavo de 2"	1/2	kg	S/ 6.00	S/ 3.00	FERRETERÍA "SANTA LUCIA"
2.6	Clavo de 3"	1/2	kg	S/ 4.50	S/ 2.25	FERRETERÍA "SANTA LUCIA"
<b>3</b>	<b>SISTEMA DE RIEGO *</b>					
3.1	Mini válvulas de control de 16mm	4	und.	S/ 1.20	S/ 4.80	ORBES. SAC
3.2	Manguera ciega de 16mm clase 4mil	15	mt	S/ 0.80	S/ 12.00	ORBES. SAC
3.3	Gotero autocompensado de 2.3L/hr marca Katif	1	und.	S/ 0.50	S/ 0.50	ORBES. SAC
3.4	Unión dentada de 16 mm	45	und.	S/ 0.30	S/ 13.50	ORBES. SAC
3.5	Terminal 8 para final de línea	3	und.	S/ 0.30	S/ 0.90	ORBES. SAC
<b>4</b>	<b>SERVICIO E INSTALACIÓN</b>					

Continuación ...

4.1	Instalación en la zona del lisímetro	3	Día	S/ 80.00	S/ 240.00	INSTALACIÓN PROPIA
4.2	Instalación en la zona de descarga	2	Día	S/ 80.00	S/ 160.00	INSTALACIÓN PROPIA
4.3	Sistema de Riego	1	Día	S/ 80.00	S/ 80.00	INSTALACIÓN PROPIA
<b>5</b>	<b>EQUIPOS **</b>					
5.1	Sensor de humedad Watermark	1	und	S/ 225.00	S/ 225.00	TECFRESH SAC
5.2	Tensiómetro SR-212, 30 cm, Irrometer	1	und	sin costo	sin costo	UNALM-FIA
5.3	Medidor digital Watermark	1	und	sin costo	sin costo	UNALM-FIA
5.3	Equipos de escritorio	1	und	S/ 100.00	S/ 100.00	PROPIO
		<b>COSTO TOTAL:</b>			<b>S/ 1,453.45</b>	

(\*) la investigación desarrollada en el área demostrativa de riego ya contaba un sistema de riego instalado: cabezal, matriz, arcos de riego y líneas porta regantes; por lo que solo se procedió a la instalación de la parte superficial. Otro punto para resaltar es que la lista de materiales no corresponde al total utilizado ya que esta investigación fue desarrollada en paralelo con otras tres investigaciones por lo que solo se mencionó lo utilizado para esta tesis en específica.

(\*\*) hay equipos que se usaron indirectamente como: horno de laboratorio, balanza, etc. Las cuales fueron facilitados por el departamento de recursos hídricos y no acuso ningún costo alguno.

## Anexo 2: Preparación del terreno (fotos)



**Riego pesado mediante aspersores móviles**



**Proceso de arado mediante un tractor agrícola**

FUENTE: tomado de NATIVIDAD, 2018





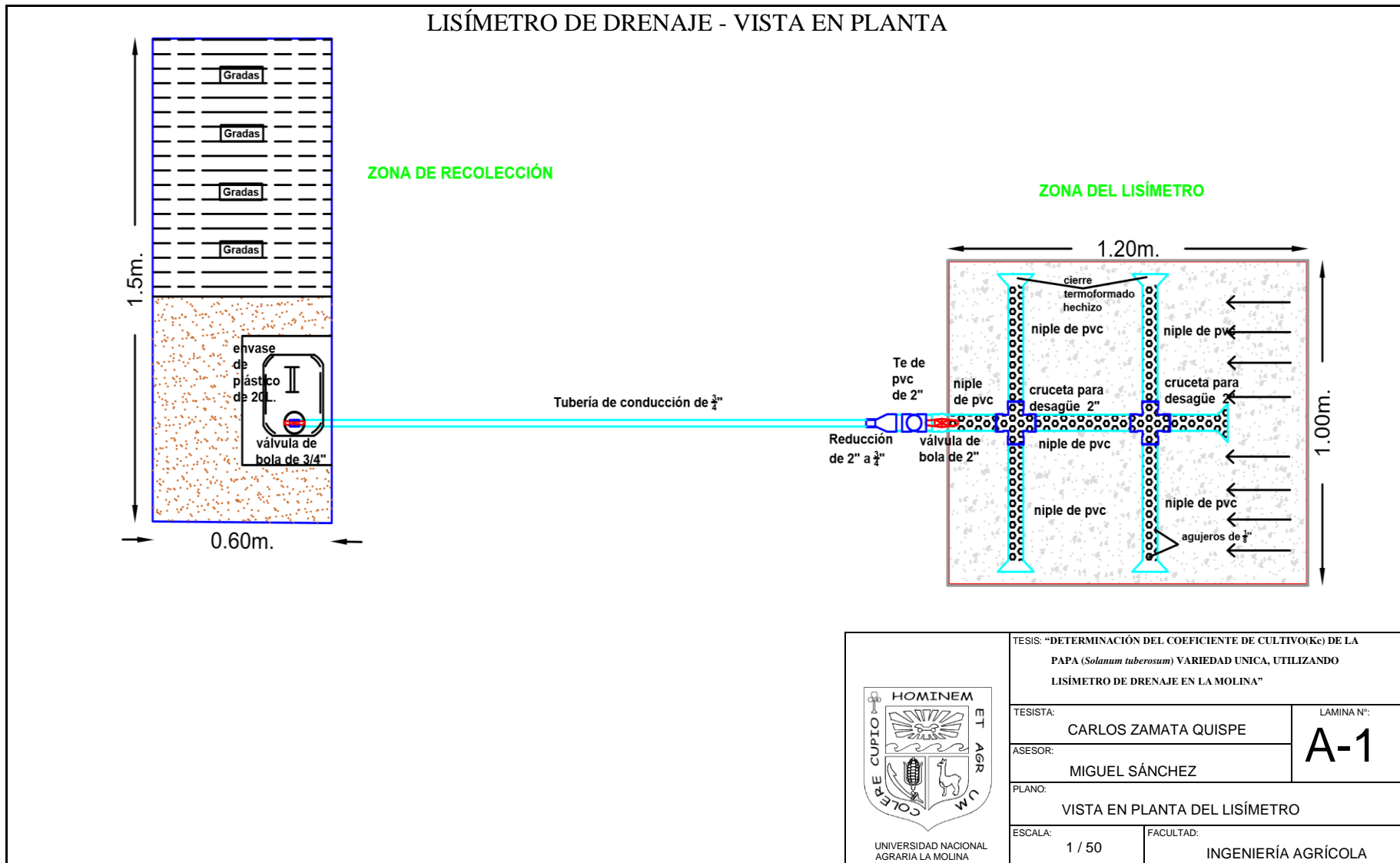
**Proceso laboreo manual**

FUENTE: tomado de NATIVIDAD, 2018

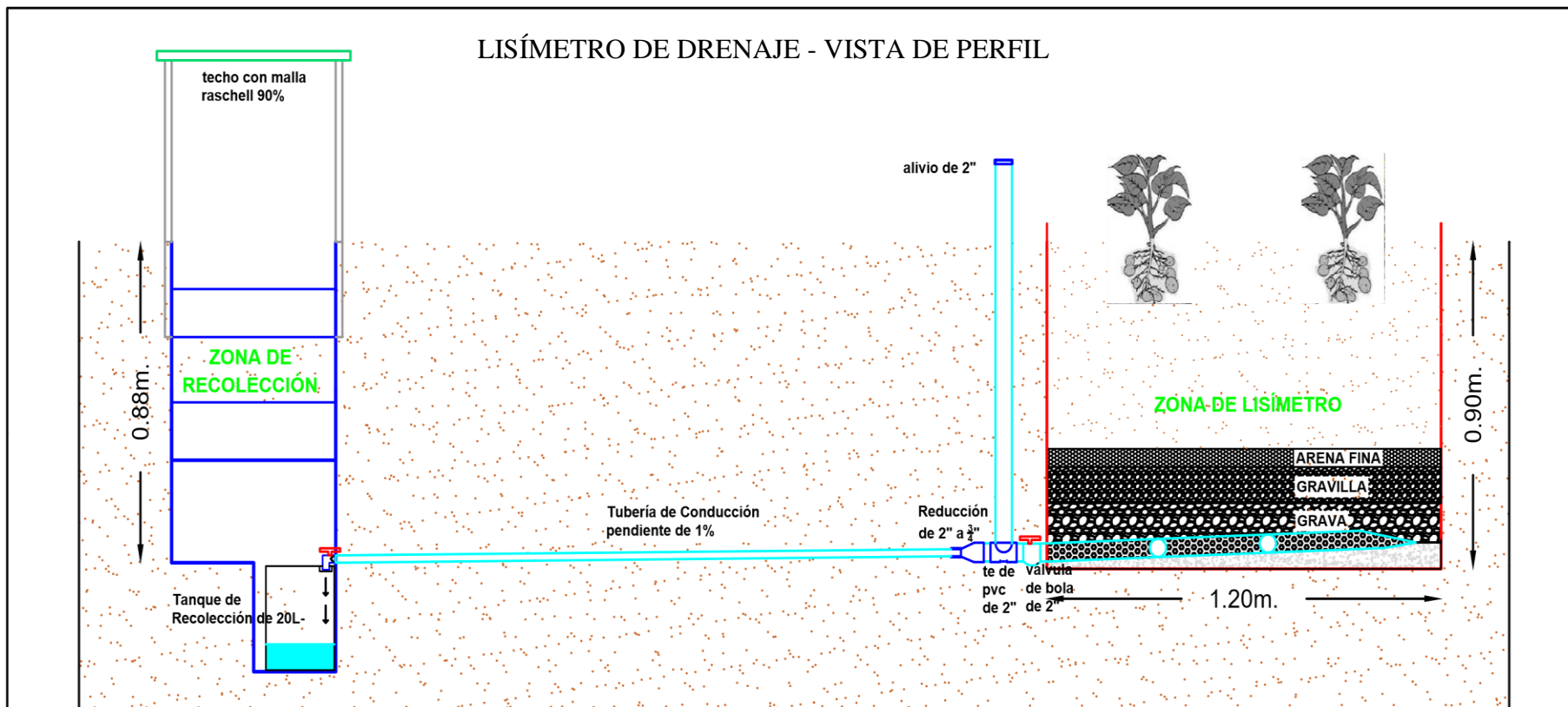



**Algunas parcelas niveladas y listas para el tendido de la manguera de gote**

Anexo 3: Diseño del lisímetro (vista en planta)



VISTA EN PERFIL



 HOMINEM ET AGR U.M. COLE RE CUPTO UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA	TESIS: "DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CULTIVO(Kc) DE LA PAPA ( <i>Solanum tuberosum</i> ) VARIEDAD UNICA, UTILIZANDO LISÍMETRO DE DRENAJE EN LA MOLINA"	
	TESISISTA: CARLOS ZAMATA QUISPE	LAMINA N°: <b>A-2</b>
	ASESOR: MIGUEL SÁNCHEZ	
	PLANO: VISTA DE PERFIL DEL LISÍMETRO	
ESCALA: 1 / 50	FACULTAD: INGENIERÍA AGRÍCOLA	



#### Anexo 4: Construcción e instalación del lisímetro

Excavación para la construcción del lisímetro:



Materiales usados para la construcción:



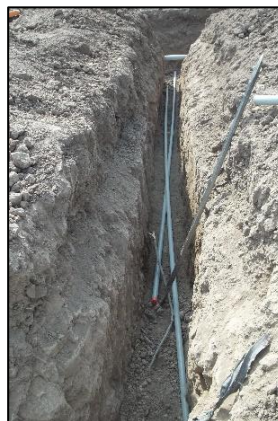
Preparación de solado y colocación del material filtrante (grava)



Compactación por capas y relleno del lisímetro:



Colocación del alivio, conducción y construcción de la zona de descarga:





## Anexo 7: Características hídricas del suelo

### Densidad aparente

Prueba 1 (antes de la construcción del lisímetro)

PROF.	Peso Suelo Seco (gr.)	Vol. cilindro (cm <sup>3</sup> )	Densidad aparente (gr /cm <sup>3</sup> )	promedios Densidad aparente (gr /cm <sup>3</sup> )
15cm - 1	159.4	110.43	1.44	1.40
15cm - 2	157.4		1.43	
15cm - 3	146.5		1.33	
30cm - 1	166.5		1.51	1.50
30cm - 2	165.1		1.50	
30cm - 3	164.5		1.49	

Prueba 2 (después de la construcción del lisímetro)

PROF.	Peso Suelo Seco (gr.)	vol. cilindro (cm <sup>3</sup> )	Densidad aparente (gr /cm <sup>3</sup> )	promedios Densidad aparente (gr /cm <sup>3</sup> )
15cm - 1	151.6	110.43	1.37	1.41
15cm - 2	153.8		1.39	
15cm - 3	162.4		1.47	
30cm - 1	159.4		1.44	1.45
30cm - 2	166.4		1.51	
30cm - 3	153.5		1.39	

### Contenido de humedad

Dia 1				
PROF.	Peso Suelo Húmedo (gr.)	Peso Suelo Seco (gr.)	Humedad W (%)	Humedad $\Theta$ (%)
15cm - 1	43.4	35.3	22.95	34.42
15cm - 2	32.9	26.9	22.30	33.46
15cm - 3	38.15	31.1	22.67	34.00
30cm - 1	36.7	29.75	23.36	35.04
30cm - 2	40.2	32.6	23.31	34.97
30cm - 3	33.2	26.9	23.42	35.13

<b>Dia 2</b>				
<b>PROF.</b>	<b>Peso Suelo Húmedo (gr.)</b>	<b>Peso Suelo Seco (gr.)</b>	<b>Humedad W (%)</b>	<b>Humedad <math>\Theta</math> (%)</b>
<b>15cm - 1</b>	40.4	33.7	19.88	27.04
<b>15cm - 2</b>	45.1	38.5	17.14	23.31
<b>15cm - 3</b>	42.75	36.1	18.42	25.05
<b>30 cm - 1</b>	44.35	37.25	19.06	25.92
<b>30cm - 2</b>	37.9	31.9	18.81	25.58
<b>30cm - 3</b>	50.8	42.6	19.25	26.18

<b>Dia 3</b>				
<b>PROF.</b>	<b>Peso Suelo Húmedo (gr.)</b>	<b>Peso Suelo Seco (gr.)</b>	<b>Humedad W (%)</b>	<b>Humedad <math>\Theta</math> (%)</b>
<b>15cm - 1</b>	39.6	33.7	17.51	23.81
<b>15cm - 2</b>	47.2	40.3	17.12	23.29
<b>15cm - 3</b>	43.4	37	17.30	23.54772441
<b>30cm - 1</b>	42.25	35.8	18.02	24.50844944
<b>30cm - 2</b>	41.5	35.1	18.23	24.80
<b>30cm - 3</b>	43	36.5	17.81	24.22

<b>Dia 4</b>				
<b>PROF.</b>	<b>Peso Suelo Húmedo (gr.)</b>	<b>Peso Suelo Seco (gr.)</b>	<b>Humedad W (%)</b>	<b>Humedad <math>\Theta</math> (%)</b>
<b>15cm - 1</b>	51.4	44	16.82	22.87
<b>15cm - 2</b>	39.3	33.8	16.27	22.13
<b>15cm - 3</b>	45.35	38.9	16.58	22.55
<b>30cm - 1</b>	48.3	41.3	16.95	23.05
<b>30cm - 2</b>	47.3	39.8	18.84	25.63
<b>30cm - 3</b>	49.3	42.8	15.19	20.65

## Anexo 8: Determinación del coeficiente de uniformidad

PARCELA N° 4			
gotero autocompensado tipo katif	tiempo prueba = 1min.		
	presión prueba = 1 bar.		
	q = ml/min		
N° GOTERO	línea 1	línea 2	línea 3
1	44	45	48
2	50	53	45
3	58	46	42
4	48	46	45
5	52	45	46
6	46	46	44
7	48	41	44
8	52	45	45
9	44	42	44
10	50	44	45
11	52	50	43
12	52	50	46
13	42	52	46
14	48	46	52
15	48	50	50
16	45	48	44
q25	suma qmin.	518	43.17
	n°qmin.	12	
qtotal	suma qtotales	2257	47.02
	n°qtotales	48	
<b>CU_parcela 4 = 92%</b>			

ZONA DEL LISÍMETRO			
q25	suma qmin.	86	43.00
	n°qmin.	2	
qtotal	suma qtotales	278	46.33
	n°qtotales	6	
<b>CU_zona del lisímetro = 93%</b>			

**Anexo 9: Variación de humedad en el suelo mediante instrumentos de medición (calibración)**

<b>Humedad %</b>	<b>Tensiómetro IRROMETER (Cbar.)</b>	<b>Sensor WATERMARK (Cbar.)</b>
43	2	1
23.36	10	8
19.04	18	15
18.02	29	22
16.99	36	30
16.07	43	36

**Anexo 10: Variables registradas para la obtención del kc**

	día	fecha	Lámina de riego (mm.)	Precipitación (mm.)	Lámina drenada (mm.)	Variación de Humedad		ETc		ETo tanque (mm.)	COEFICIENTE DE CULTIVO		
						Tensiómetro (mm.)	Watermark (mm.)	Tensiómetro (mm.)	Watermark (mm.)		Kc Tensiómetro (mm.)	Kc Watermark (mm.)	
FASE I	1									3.70			
	4	14-Jun	5.97		5.09	-1.13	-1.09	2.01	1.96	3.60	0.56		0.55
	6	17-Jun	5.81		4.31	0.74	0.32	0.76	1.17	3.25	0.23		0.36
	8	19-Jun	5.24		4.57	0.54	0.26	0.13	0.41	2.06	0.06		0.20
	10	21-Jun	3.32		1.69	0.51	0.42	1.11	1.20	2.54	0.44		0.47
	12	23-Jun	4.10		2.19	0.35	0.10	1.56	1.82	4.04	0.39		0.45
	14	25-Jun	6.52		4.18	0.50	0.25	1.84	2.10	3.60	0.51	0.41	0.58
	16	27-Jun	5.81		4.12	0.35	0.58	1.34	1.11	2.66	0.50		0.42
	18	29-Jun	4.30		2.65	0.42	0.49	1.22	1.16	2.07	0.59		0.56
	20	1-Jul	3.33		2.20	-0.13	-0.23	1.26	1.37	2.39	0.53		0.57
	22	3-Jul	3.85		2.30	0.06	-0.09	1.49	1.65	2.38	0.63		0.69
	24	5-Jul	3.84		1.85	0.21	0.31	1.78	1.69	3.33	0.53		0.51

Continuación...

	día	fecha	Lámina de riego (mm.)	Precipitación (mm.)	Lámina drenada (mm.)	Variación de Humedad		ETc		ETo tanque (mm.)	COEFICIENTE DE CULTIVO			
						Tensiómetro (mm.)	Watermark (mm.)	Tensiómetro (mm.)	Watermark (mm.)		Kc Tensiómetro (mm.)	Kc Watermark (mm.)		
FASE II	26	7-Jul	5.37		2.90	0.45	0.30	2.02	2.17	3.24	0.62	0.61	0.67	0.66
	28	9-Jul	5.22		3.95	-0.15	-0.28	1.43	1.56	2.39	0.60		0.65	
	30	11-Jul	3.85		2.58	-0.02	-0.17	1.28	1.43	2.71	0.47		0.53	
	32	13-Jul	4.36		2.49	0.25	0.41	1.63	1.47	3.10	0.52		0.47	
	34	15-Jul	5.00		3.91	-0.22	-0.31	1.31	1.40	2.07	0.63		0.68	
	36	17-Jul	3.34		0.98	-0.35	-0.32	2.71	2.68	5.10	0.53		0.53	
	38	19-Jul	8.23		6.41	0.08	0.10	1.74	1.72	2.73	0.64		0.63	
	40	21-Jul	4.40		2.05	0.21	0.25	2.14	2.11	3.20	0.67		0.66	
	42	23-Jul	5.17		3.12	-0.28	-0.03	2.33	2.08	3.43	0.68		0.61	
	44	25-Jul	5.53		3.11	0.39	0.46	2.03	1.97	3.42	0.59		0.57	
	46	27-Jul	5.52		3.02	0.09	0.26	2.41	2.24	3.73	0.65		0.60	
	48	29-Jul	6.02		3.32	0.35	0.00	2.35	2.70	3.56	0.66		0.76	
	50	31-Jul	5.74		4.12	0.08	0.10	1.54	1.52	2.54	0.61		0.60	
	52	2-Ago	4.09		2.60	-0.35	-0.20	1.84	1.69	2.88	0.64		0.59	
54	4-Ago	4.65		2.99	-0.28	-0.32	1.94	1.99	2.58	0.75	0.77			

Continuación...

	día	fecha	Lámina de riego (mm.)	Precipitación (mm.)	Lámina drenada (mm.)	Variación de Humedad		ETc		ETo tanque (mm.)	COEFICIENTE DE CULTIVO			
						Tensiómetro (mm.)	Watermark (mm.)	Tensiómetro (mm.)	Watermark (mm.)		Kc Tensiómetro (mm.)	Kc Watermark (mm.)		
FASE III	56	6-Ago	4.16		3.58	0.01	0.13	0.58	0.45	0.57	1.00	1.12	0.79	1.18
	58	8-Ago	0.93		0.15	-0.65	-0.79	1.42	1.56	1.87	0.76		0.84	
	60	10-Ago	3.01		0.70	-0.28	-0.40	2.59	2.71	2.55	1.02		1.06	
	62	12-Ago	4.11		2.33	-0.35	-0.17	2.13	1.95	1.96	1.08		0.99	
	64	14-Ago	3.17		0.02	-0.14	-0.37	3.29	3.51	3.60	0.91		0.97	
	66	16-Ago	5.81	0.25	2.28	-0.14	-0.49	3.93	4.28	4.03	0.97		1.06	
	68	18-Ago	6.50		5.14	0.25	0.29	1.11	1.07	0.85	1.30		1.25	
	70	20-Ago	1.37		0.00	-1.49	-1.66	2.86	3.03	3.37	0.85		0.90	
	72	22-Ago	5.43	0.25	2.13	-0.04	-0.04	3.59	3.59	3.72	0.96		0.96	
	74	24-Ago	6.00		2.95	0.35	-0.40	2.71	3.46	2.61	1.04		1.32	
	76	26-Ago	4.21		0.72	0.01	0.15	3.48	3.35	2.69	1.29		1.24	
	78	28-Ago	4.35		1.14	-0.42	-0.17	3.63	3.38	3.14	1.16		1.08	
	80	30-Ago	5.06		0.95	-0.01	0.29	4.12	3.82	3.01	1.37		1.27	
	82	1-Set	4.86		1.75	-0.29	-0.46	3.41	3.57	3.56	0.96		1.00	
84	3-Set	5.74		3.08	0.35	0.04	2.31	2.62	2.19	1.06	1.20			

Continuación...

	día	fecha	Lámina de riego (mm.)	Precipitación (mm.)	Lámina drenada (mm.)	Variación de Humedad		ETc		ETo tanque (mm.)	COEFICIENTE DE CULTIVO			
						Tensiómetro (mm.)	Watermark (mm.)	Tensiómetro (mm.)	Watermark (mm.)		Kc Tensiómetro (mm.)	Kc Watermark (mm.)		
FASE IV	86	5-Set	3.53		1.10	-0.21	-0.41	2.64	2.84	3.32	0.80	0.81	0.86	0.79
	88	7-Set	5.35		2.30	-0.48	-0.65	3.53	3.70	4.44	0.79		0.83	
	90	9-Set	7.17	0.25	4.99	0.41	0.75	2.01	1.68	1.82	1.11		0.92	
	92	11-Set	2.93	0.50	0.48	0.71	0.46	2.25	2.50	2.95	0.76		0.85	
	94	13-Set	4.76		3.83	0.46	0.56	0.46	0.37	0.53	0.88		0.70	
	96	15-Set	0.85		0.07	-0.76	-0.95	1.53	1.72	2.56	0.60		0.67	
	98	17-Set	4.12		1.15	-0.66	-0.41	3.63	3.38	4.28	0.85		0.79	
	100	19-Set	6.90		4.40	-0.13	-0.28	2.63	2.78	3.40	0.77		0.82	
	102	21-Set	5.48		3.97	0.42	0.49	1.09	1.02	1.39	0.78		0.73	
	103	23-Set	2.24		0.29	-0.11	-0.29	2.06	2.25	2.88	0.72		0.78	



### **Anexo 11: Coeficiente de cultivo (comparación)**

Actualmente en el Perú no existe mucha información en cuanto a la estimación del coeficiente de cultivo de la papa variedad unica; sin embargo, la autoridad autónoma de majes (AUTODEMA) viene realizando investigaciones y publicaciones en esta materia. Aun así, estas investigaciones son propias para las condiciones edafoclimáticas donde se desarrolló la experimentación; en este caso las costas de Arequipa. A continuación, se presenta una tabla comparativa entre el coeficiente de cultivo determinado por el AUTODEMA y el determinado en esta investigación:

<b>PERIODO VEGETATIVO (Semanas)</b>	<b>AUTODEMA Kc</b>	<b>TESIS (Investigación Lisímetro) Kc_tensiometro</b>
1 - 4	0.3	0.41
5 - 7	0.6	0.61
8 - 10	1.1	1.09
11 - 13	1.35	1.12
14 - 15	1.2	0.76
105 DÍAS		

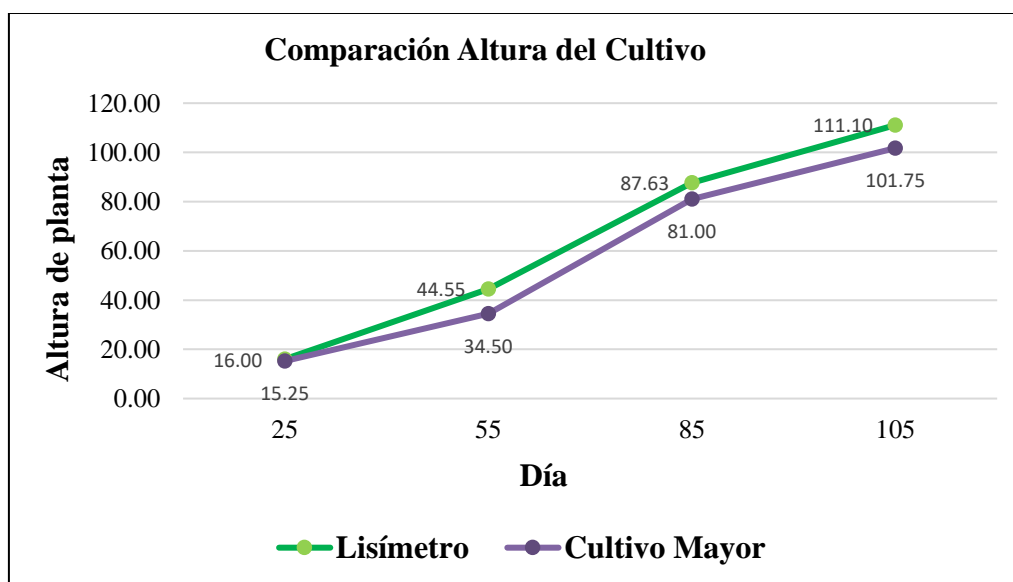
Los valores de coeficiente de cultivo fueron presentados en semanas puesto que la información obtenida por la AUTODEMA se presenta en periodos de semanas, así que los valores obtenidos en esta investigación también fueron en periodos de semana.

De la tabla comparativa se desprende que el valor de kc obtenido en esta investigación durante las 7 primeras semanas fue ligeramente superior a la de AUTODEMA, pero desde la semana 8 hasta la semana 15 el valor de Kc disminuye notoriamente. Y si hacemos un cálculo ponderado durante todo el periodo vegetativo encontramos que el valor de kc promedio determinado por el lisímetro de drenaje en la molina es 6% menor al determinado por el AUTODEMA traduciéndose en ahorro de agua, claro hay que tener en cuenta las características edafoclimatológicas para cada estudio.

## Anexo 12: Parametros biométricos (comparación)

Como se hizo mención la construcción del lisímetro para la determinación de coeficiente de cultivo se realizó en paralelo y dentro de un cultivo mayor de la misma variedad unica; presentando diferencias en cuanto a su aporte hídrico dentro del lisímetro y el cultivo mayor. Teniendo en cuenta que el cultivo mayor se dosifico hídricamente en función a un kc ya determinado por estudios realizados en la costa Arequipeña a cargo de (AUTODEMA, 2015). A continuación, se muestra algunas variables biométricas a fin de comparación.

### Altura de planta

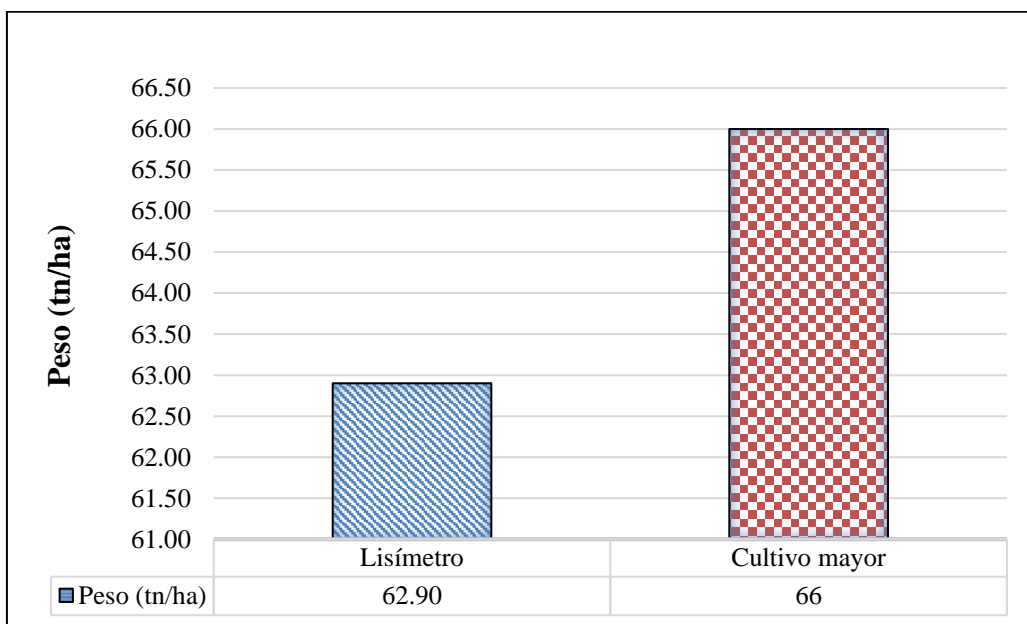
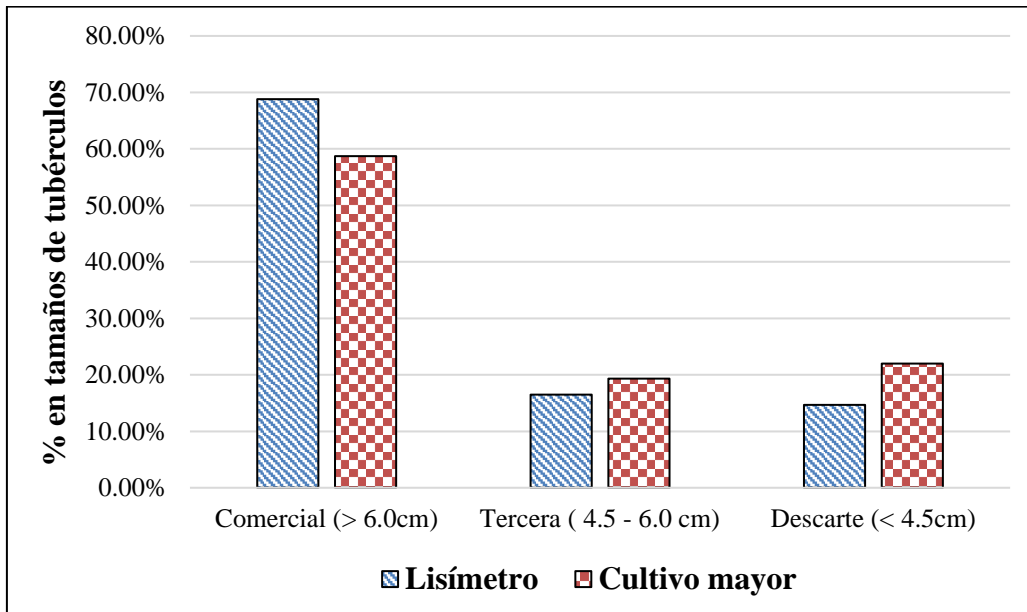


El cultivo mayor se desarrolló bajo otra dosificación hídrica

### Números de tallos principales por planta

	# tallos por planta Antes del aporque (día 30)	# tallos por planta Antes de la cosecha (día >105)
EN EL LISÍMETRO	5.25	5
EN EL CULTIVO MAYOR	4.6	4.4

## Rendimiento del cultivo



Como se observa en la figura anterior el rendimiento alcanzado en nuestro lisímetro es casi similar al rendimiento del cultivo mayor, el cual se desarrolló en función a un coeficiente de cultivo diferente pudiendo ser debido al mayor contenido de humedad suministrado.