

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA Y PARÁMETROS
BIOMÉTRICOS PARA LA APLICACIÓN DEL RIEGO DEL MAIZ
AMARILLO DK7088 (*Zea mays* L.) EN LA MOLINA”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERA METEORÓLOGA**

SAMY CAROLINA FALCÓN CÁCERES

LIMA – PERÚ

2020

La UNALM es la titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación

(Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual)

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA Y PARÁMETROS
BIOMÉTRICOS PARA LA APLICACIÓN DEL RIEGO DEL MAIZ AMARILLO
DK7088 (*Zea mays L.*) EN LA MOLINA”**

Presentada por:

Samy Carolina Falcón Cáceres

Tesis para optar el Título Profesional de:

Ingeniera Meteoróloga

Sustentada y aprobada por el siguiente Jurado:

.....
M. Sc. Juan Carlos Chang Chang Fun

PRESIDENTE

.....
Ing. Franklin Delio Unsihuay Tovar

MIEMBRO

.....
Ing. Hugo Oswaldo Ramos Inca Roca

MIEMBRO

.....
Mg. Sc. Jerónimo García Villanueva

ASESOR

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación está dedicado a mi madre Zoila Cáceres M. por ser el pilar más importante de mi vida, por demostrarme su amor y apoyo incondicional sin importar las situaciones complicadas que se hayan podido presentar a lo largo de toda esta travesía.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar agradecer a Dios por brindarme la fortaleza, sabiduría y capacidad para jamás desistir y continuar bajo su protección.

Mi más profundo agradecimiento a la persona que confió en mí, a mi asesor de la tesis Mg. Sc. Jerónimo García V. por su permanente apoyo, paciencia y confianza en el transcurso del presente trabajo.

A mi esposo Yonhy A. por su apoyo incondicional desde el inicio hasta el término de esta investigación, por sus palabras de aliento y paciencia a lo largo de estos años. A mi hijo Liam A. por ser la mayor bendición que Dios me haya dado y, ser la fuerza que me impulse día a día.

A los señores Ignacio Paucar (Nachito), Augusto Solis y Johan Ninanya por el apoyo brindado a lo largo de esta tesis.

Finalmente, a mi alma mater, la Universidad Agraria La Molina por contar con profesores que supieron enriquecer mis conocimientos durante mi carrera universitaria.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Generalidades del cultivo de maíz amarillo duro	3
2.2. Características morfológicas y taxonómicas del maíz	8
2.3. Características del maíz amarillo duro	9
2.4. Fenología del maíz amarillo duro.....	9
2.5. Descripción del híbrido de maíz amarillo duro Dekalb 7088	14
2.6. Requerimientos climáticos del maíz amarillo duro.....	15
2.6.1. Influencia de la temperatura	15
2.6.2. Influencia del fotoperiodo	18
2.6.3. Influencia de la radiación solar	18
2.6.4. Requerimiento de agua.....	21
2.6.5. Requerimiento de suelo.....	22
2.7. Exposición general del problema de agua.....	22
2.8. Requerimiento hídrico de cultivos	26
2.9. El maíz amarillo duro a nivel nacional.....	29
2.9.1. Principales indicadores de la actividad de maíz amarillo duro	29
2.9.2. Producción nacional	30
2.10. Evapotranspiración.....	31
2.10.1. Evapotranspiración actual o real (E)	31
2.10.2. Evapotranspiración potencial (Eo)	32
2.10.3. Evapotranspiración máxima (E _m).....	32
2.11. Lisímetros	32
2.12. Eficiencia de uso de agua	33
2.13. Observaciones biológicas y fenológicas.....	35
2.13.1. Fases fenológicas.....	35
2.13.2. Momentos fenológicos de la fase	35
III. METODOLOGÍA	38
3.1. Ubicación del área experimental	38

3.2. Materiales y equipos.....	38
3.3. Datos climáticos	38
3.4. Metodología.....	39
3.4.1. Determinación de la demanda hídrica del cultivo de maíz	39
3.4.2. Determinación de los parámetros biométricos de aplicación de riego del cultivo.....	45
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
4.1. Determinación de la demanda hídrica del cultivo	48
4.1.1. Calibración del lisímetro	48
4.1.2. Requerimiento hídrico	48
4.2. Determinación de los parámetros biométricos de aplicación de riego del cultivo.....	65
4.2.1. Determinación de las fechas en las que el cultivo alcanzó la finalización de las distintas etapas y duración de ellas	65
4.2.2. Determinación de la profundidad de raíz en cada etapa.....	66
V. CONCLUSIONES.....	74
VI. RECOMENDACIONES.....	75
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	76
VIII. ANEXOS	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Fases fenológicas del maíz	10
Tabla 2: Principales características del híbrido Dekalb 7088.....	15
Tabla 3: Algunos factores ambientales que afectan la eficiencia de conversión (CE) en el maíz tropical de zonas bajas	20
Tabla 4: Producción y superficie cosechada en el Perú.....	29
Tabla 5: Fertilizaciones realizadas en la parcela experimental	43
Tabla 6: Etapas de desarrollo del cultivo	45
Tabla 7: Humedad del suelo (%) en capacidad de campo en parcela experimental.....	48
Tabla 8: Demanda hídrica durante el período de emergencia hasta el 10 % de desarrollo vegetativo y en la etapa del 10 % al 80 % del desarrollo vegetativo	50
Tabla 9: Demanda hídrica durante el período del 80 % al 100 % de desarrollo vegetativo	51
Tabla 10: Demanda hídrica durante el período de maduración.....	52
Tabla 11: Demanda hídrica total por etapas en el período vegetativo total	53
Tabla 12: Estimación de la demanda hídrica con Penman Monteith	55
Tabla 13: Estimación de la demanda hídrica con Penman Modificado	59
Tabla 14: Inicio, fin y duración de las etapas del desarrollo vegetativo	65
Tabla 15: Profundidad de raíz en cada etapa.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Fases fenológicas del maíz.....	12
Figura 2: Principales zonas productoras de maíz amarillo duro. Año 2017.....	30
Figura 3: Perfil vertical del contenido sólido del lisímetro.	43
Figura 4: Instalación del lisímetro.	44
Figura 5: Demanda hídrica del maíz – Método Lisímetro.....	54
Figura 6: Demanda hídrica del maíz – Métodos: Lisímetro, Penman Monteith y Modificado.	64

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Datos climáticos del observatorio meteorológico Alexander Von Humboldt.....	81
Anexo 2: Parámetros biométricos en las distintas etapas	87
Anexo 3: Inicio, fin y duración de las fases fenológicas	87
Anexo 4: Materia seca de los granos de maíz	87
Anexo 5: Comportamiento de la demanda hídrica (Em) con la temperatura (°C)	88
Anexo 6: Comportamiento de la demanda hídrica (Em) con la radiación solar (Qi).....	88
Anexo 7: Comportamiento de la demanda hídrica (Em) con el tanque de evaporación	89
Anexo 8: Comportamiento de la demanda hídrica (Em) con la humedad relativa (%).....	89
Anexo 9: Rendimiento del cultivo.....	89

RESUMEN

El presente trabajo experimental se llevó a cabo con el objetivo de determinar el requerimiento hídrico y algunos parámetros biométricos del cultivo de maíz amarillo duro DK 7088; así como, determinar el coeficiente de cultivo (K_c) en base al lisímetro y compararlo con el K_c de la FAO. La demanda hídrica del cultivo se realizó cuantificando la evapotranspiración máxima con un lisímetro de tipo nivel freático constante; el suelo dentro del lisímetro se mantuvo en condiciones óptimas de humedad a través de un dispositivo controlador de nivel freático constante. Las lecturas del lisímetro se realizaron diariamente para poder determinar la demanda hídrica diaria. Seguidamente, para determinar los parámetros biométricos se realizaron observaciones y muestreos de plantas. Finalmente, para determinar el K_c se hizo uso de la evapotranspiración real de lisímetro y de la evapotranspiración de referencia de los métodos Penman Monteith y Penman Modificado. Los resultados obtenidos indicaron que la necesidad de agua en todo el ciclo vegetativo del cultivo fue 352.8 mm con un rendimiento de 15097 kg/ha en condiciones del lisímetro. La profundidad media del 80 por ciento del sistema radicular del cultivo al finalizar las etapas I, II, III y IV fueron 13.7, 27.8, 41.2 y 41.2 cm, respectivamente. Adicionalmente, el tiempo de duración de las etapas mencionadas anteriormente fueron de 21, 37, 62 y 42 días, respectivamente.

Palabras clave: Parámetros biométricos, evapotranspiración máxima, lisímetro, condiciones óptimas, rendimiento.

ABSTRACT

The present experimental work was carried out with the objectives of determining the water requirement and some biometric parameters of the DK 7088 yellow hard maize crop; as well as, determine the crop coefficient (Kc) based on lysimeter and compare it with the FAO Kc. The water demand of the crop was done quantifying the maximum evapotranspiration with a constant phreatic level lysimeter; the soil inside the lysimeter was maintained in optimal humidity conditions through a constant groundwater control device. Lysimeter readings were performed daily. Next, to determine the biometric parameters, observations and sampling of plants were performed. Finally, to determine the Kc was used lysimeter real evapotranspiration and the reference evapotranspiration of the Penman Monteith and Modified Penman methods.. The results indicated that the need for water throughout the vegetative cycle of the crop was 352.8 mm with a yield of 15097 kg / ha under field capacity conditions lysimeter. The average depth of 80 percent of the root system of the crop at the end of stages I, II, III and IV were 13.7, 27.8, 41.2 and 41.2 cm, respectively. Additionally, the duration of the stages mentioned above were 21, 37, 62 and 42 day, respectively.

Keywords: Biometric parameters, maximum evapotranspiration, lysimeter, optimal conditions, yield.

I. INTRODUCCIÓN

El maíz junto con el trigo y el arroz, es uno de los tres cereales más importantes del mundo y uno de los cultivos más importantes del Perú. Se trata de un cultivo con consumo de agua importante, que pueden limitar su expansión en zonas de recursos hídricos limitados.

Considerando que el cultivo de maíz se produce en las tres regiones naturales del país, es en la Sierra y Costa donde el recurso agua es deficitario por lo que su producción y productividad se ve limitado por este factor; este hecho obliga a hacer un manejo racional de este recurso en la práctica de riego. Por otro lado, en los sistemas de riego tecnificado es esencial el conocimiento de la cantidad adecuada de lámina de agua a aplicar en cada riego así como el momento oportuno de su aplicación y en sus diferentes etapas de desarrollo vegetativo. Estos aspectos básicos pueden determinarse a través de estudios de requerimientos hídricos y monitoreo del balance hídrico respectivamente. La evaluación del requerimiento hídrico se realiza analizando la evapotranspiración máxima del cultivo con la instalación y funcionamiento de un lisímetro.

El conocimiento de la demanda hídrica, tiene su importancia en el monitoreo del balance hídrico de la planta cultivada y para la aplicación de riego. Por otro lado, para poder cumplir con estas acciones se hace necesario determinar o conocer previamente ciertos parámetros de desarrollo del cultivo (parámetros biométricos) tales como la profundidad media de raíces, duración de las etapas de desarrollo del cultivo, tiempo necesario para alcanzar la finalización de una determinada etapa de desarrollo del cultivo, etc.

En la actualidad, es necesario tener en cuenta el consumo de agua del cultivo para establecer las necesidades de las plantas durante el periodo vegetativo. Es por ello, que este tipo de investigaciones ayuda a evitar el desperdicio excesivo de agua, que no solo resulta antieconómico sino también necesario para la vida biótica.

En nuestro país, el maíz amarillo es uno de los cultivos más importantes por su relación con la cadena productiva maíz, avicultura y porcicultura. Nuestra costa peruana reporta la mayor producción y productividad; sin embargo, la escasez de agua es el principal problema que afronta dicha región; por lo que, se establece la necesidad del estudio de su requerimiento hídrico que es tema de la presente tesis. Por ello se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Determinar la demanda hídrica del cultivo de maíz.
- Determinar los parámetros biométricos de aplicación de riego del cultivo.
- Determinar el K_c (coeficiente de cultivo) en base al lisímetro.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Generalidades del cultivo de maíz amarillo duro

El maíz amarillo duro (MAD) es uno de los cultivos más importantes del Perú con 283 000 hectáreas cultivadas en 2017, es el segundo en extensión a nivel nacional, después del arroz. Se siembra mayormente en la costa y la selva, siendo Lambayeque, La Libertad, Ancash, Lima y San Martín los principales departamentos productores, que, en conjunto, representan el 55 por ciento de área cultivada, siendo la zona de Lima (Cañete, Chancay-Huaral, Huacho, Barranca) la que ocupa el primer lugar en su participación con el 20 por ciento de la producción total de este cultivo. En orden de importancia sigue La Libertad con el 15 por ciento.

Constituye uno de los principales enlaces de la Cadena Alimentaria del país, la cual inicia con su cultivo y termina en las cadenas e industria de carne de aves y cerdos respectivamente.

En el año 2011 la producción de maíz amarillo duro fue cercano a 1,262 miles de toneladas métricas, lo que generó un valor bruto de la producción de 512.9 millones de nuevos soles.

El MAD producido en el Perú posee un alto valor proteico y buena concentración de caroteno a diferencia del MAD importado, por lo que es apreciado por las principales empresas dedicadas a la industria avícola, que minimizan el uso de harina de marigold en la alimentación de sus aves para la producción de carne y huevos (MINAM, 2012).

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los principales cereales cultivados para la alimentación humana y animal en muchos países (Zarkadas *et al.*, 1995; citado por Yzarra *et al.*, 2010), siendo de gran importancia económica a nivel mundial. Globalmente, el maíz se cultiva en más de 140 millones de hectáreas, con una producción anual de más de 580 millones de

toneladas métricas, por lo que actualmente el maíz es el segundo cultivo más producido del mundo, después del trigo, mientras que el arroz ocupa el tercer lugar (Bressani, 1991; FAO, 1993; Boyer y Curtis en Hallauer, 1994; citados por Jones & Thornton, 2003). Toda la planta puede ser aprovechada y las aplicaciones posibles de este cultivo incluyen alimento, forraje y materia prima para la industria. Como alimento, se puede utilizar todo el grano, maduro o no, o bien se puede elaborar en técnicas de molienda en seco para obtener un número relativamente amplio de productos intermedios, como por ejemplo sémola de partículas de diferentes tamaños, sémola en escamas, harina y harina fina, que a su vez tienen un gran número de aplicaciones en una amplia variedad de alimentos. También pueden producirse almidón, aceite, proteínas, bebidas alcohólicas, edulcorantes alimenticios y, desde hace poco, combustible (FAO, 1993; citado por Yzarra *et al.*, 2010).

En los últimos 20 años, la producción nacional de MAD ha crecido a una tasa promedio anual superior (5.46%) a la registrada por todo el sector (4.1%) pasando de producir 433, 883 toneladas en 1990 a 1,262 miles de toneladas en el año 2011, lo cual generó un valor bruto de la producción de 512.9 millones de nuevos soles.

Las principales zonas productoras son, en orden de importancia, la Costa Norte (34%), Costa Centro (33%), Selva Alta (25%) y la Selva Baja (8%). Aunque la producción de la Selva Alta ocupa el tercer lugar, la superficie dedicada al cultivo es prácticamente equivalente a toda la superficie cosechada tanto en la Costa Norte como en la Costa Central. Entre los principales departamentos que forman parte de la oferta productiva nacional destacan en la Costa Centro, Lima (19%), Ancash (7.16%) e Ica (6.8%); en la Costa Norte, La Libertad (17.4%), Lambayeque (9.26%) y Piura (6.65%) y en la Selva Alta, San Martín (11.02%).

Asimismo, la dinámica de crecimiento ha sido distinta en cada zona y región productora. La Costa Norte ha liderado el crecimiento con una tasa de variación promedio anual de 9.5 por ciento, seguida por la Selva Baja con 8.6 por ciento, la zona Costa Centro con 6.3 por ciento y la Selva Alta con 6 por ciento. Finalmente, aunque el aporte de la Costa Sur a la oferta nacional de MAD no es representativo, su tasa de crecimiento promedio anual sí fue importante con 4.6 por ciento, cifra superior a la del todo el sector agrícola (3.8%) (MINAG, 2012).

Específicamente en la Costa Norte, el crecimiento de la producción se sustentó tanto en la expansión de la superficie cosechada que registró la mayor tasa de todas las zonas (5.7%), como en el incremento de los rendimientos (2.4%). Destaca el departamento de La Libertad cuya producción creció a una tasa promedio anual de 17.7 por ciento, la superficie a 12.3 por ciento y los rendimientos a 4.1 por ciento. Estos resultados se explican por el dinamismo del sector avícola en dicho departamento. El número de pollos de engorde en la Libertad registró la segunda tasa de crecimiento más alta (249%) entre los años 1994 y 2012, después de la de Madre de Dios (276%) en la Selva Baja (IV CENAGRO, 2012). En el año 2011, el departamento de la Libertad produjo el 19 por ciento de la oferta con el 56 por ciento de participantes. Ambas, en conjunto, albergan al 37 por ciento de la población de todo el Perú, constituyéndose en uno de los mercados de consumo de carne de ave más importantes (INEI, 2007).

Con respecto a la Selva Baja, aunque ocupa el cuarto lugar como productora de MAD, es la segunda con mayor tasa de crecimiento anual de la superficie cosechada (4.2%), luego de la Costa Norte (5.7%). La inmensa disponibilidad de tierras con potencial para desarrollar cultivos en limpio en esta zona es estimada en 1, 565,000 hectáreas, lo que sumado al crecimiento de la industria avícola explican la importante expansión de la superficie cosechada. Conviene resaltar el uso de las tierras de restingas en época de vaciante de los ríos, donde los pobladores ribereños desarrollan una agricultura tradicional de subsistencia y migratoria aprovechando las ventajas de fertilidad que presentan estos suelos frente a los suelos no inundables, traduciéndose esto en un ahorro importante de fertilizantes. Esta peculiaridad ha hecho atractiva la inversión no solo de la pequeña agricultura sino también de la agricultura comercial conducida por empresas privadas vinculadas a la producción de semillas y a la industria avícola; situación que se evidencia por el aumento de la población de pollos de engorde en la Selva Baja, especialmente en los departamentos de Ucayali y Madre de Dios, lugares donde entre 1994 y el 2012 esta creció en 151 por ciento y 276 por ciento, respectivamente (IV CENAGRO, 2012; citado por MINAG, 2013).

La diversidad de los ambientes bajo los cuales se cultiva el maíz es mucho mayor que la de cualquier otro cultivo. Se puede encontrar desde los 58° de latitud norte en Canadá y en Rusia y hasta los 40° de latitud sur en Argentina y Chile. La planta está adaptada a

ambientes desérticos y extremadamente húmedos y elevaciones desde 1 400 metros sobre el nivel del mar, aunque la mayor parte es cultivada a altitudes medias y su cultivo podría expandirse a nuevas áreas y a nuevos ambientes (Werner, 1997; Paliwal, 2001; citado por Schlender y Roberts, 2010).

El maíz es un pasto gigante doméstico [*Zea mays* ssp. *Mays*] de origen tropical mexicano. La planta es usada para producir granos y forraje, los cuales constituyen la base para la elaboración de un buen número de alimentos tanto para nuestra especie como para otros animales, así como para la industria farmacéutica y manufacturera. En la costa peruana, la escasez de agua es el principal problema que afronta la agricultura; como el agua es un recurso limitado, cuyo desarrollo exige grandes inversiones, su utilización debe ser eficiente para elevar la producción de las actuales áreas cultivadas e incrementar nuevas áreas irrigables (Rodas, 1985; citado por Rojas y Casas, 1987).

En muchos lugares el agua se desperdicia o se usa en exceso de las necesidades reales. En los valles de la Costa, el agua se utiliza principalmente para regadío y dado que el agua y las tierras aptas para la agricultura, se hacen cada vez más escasos, hay necesidad de lograr mayor eficiencia en la utilización de ambos recursos, difundiendo conocimientos que contribuyan a la mejora de las prácticas de riego (Rodas, 1985; citado por Rojas y Casas, 1987).

Uno de los problemas inmediatos a resolver en la agricultura es la aplicación oportuna y en cantidad adecuada del agua de riego, de tal manera que conjugándose con otras prácticas agronómicas se pueda obtener a la cosecha el rendimiento óptimo (Rodas, 1985; citado por Rojas y Casas, 1987).

Hargreaves y Christiansen (1974), citado por Rojas y Casas (1987), han resumido de diferentes fuentes, datos de producción y uso de agua, los cuales fueron obtenidos de Hawái, California, Utah, Israel y otras localidades. Los principales cultivos estudiados fueron: Caña de azúcar, alfalfa, maíz, papa y remolacha azucarera. Ellos concluyeron que:

1. No todos los cultivos son igualmente sensibles al déficit de humedad.

2. El tiempo de duración de la deficiencia de humedad, juega un papel muy importante en el crecimiento y desarrollo.
3. La humedad adecuada es de mayor importancia durante la floración y fructificación, más que otras etapas del ciclo vegetativo.

En la planificación de riego es preciso conocer los requerimientos de agua de los cultivos y en la programación del mismo es necesario tener en cuenta el consumo de agua por cultivo, para así establecer las necesidades de las plantas durante el período vegetativo. El hecho de suministrar el agua a los cultivos con precisión evita la dotación excesiva que resulta anti-económica (Delzo, 1983; citado por Abookaled y Alfaro, 1987).

El manejo eficiente del agua de riego está determinado por factores clima, suelo y cultivo. La forma como se aplica y distribuye el agua en el predio, deberá permitir entregar el agua al cultivo en cantidad y oportunidad adecuadas. Por lo tanto el sistema de riego para un predio deberá diseñarse de acuerdo a las características climáticas de la región, considerando aspectos relacionados con el suelo, el cultivo, la disponibilidad de agua, y por último el capital y mano de obra del predio (García, 1989).

Los primeros estadios de desarrollo del maíz son muy sensibles a la falta de agua y nutrientes por lo que la consolidación del cultivo demanda de una buena inversión en insumos y labores culturales. Los suelos donde se cultiva el maíz, no tienen la capacidad para proporcionar los nutrientes necesarios para el crecimiento eficiente de las plantas o no otorgan el rendimiento adecuado, para ello se debe recurrir al empleo de fertilizantes. El estudio de los factores que determinan la capacidad de absorción de nutrientes como el nitrógeno, el fósforo, el potasio y algunos micronutrientes es un tema de actualidad enfocado a incrementar la producción especialmente en suelos ácidos y alcalinos, los cuales representan la mayor superficie cultivable del planeta (Lopez-Bucio *et al.*, 2003; citado por Injante, 2013).

2.2. Características morfológicas y taxonómicas del maíz

Los cultivares locales originales de maíz, fueron en su mayoría del tipo duro. Los granos de este tipo de maíz son redondos, duros y suaves al tacto. Representa el 14 por ciento de la producción mundial y actualmente se cultiva en zonas donde se requiere tolerancia al frío. El grano de maíz tiene almidón duro rodeando toda la parte externa y solo una pequeña porción de almidón en el centro; como consecuencia, cuando se seca, se encoge uniformemente y no se desarrolla una depresión (Magness *et al.*, 1971; Paliwal, 2001; citado por Martín, 2012).

Wilkes (1979) citado por Viglizzo, (1989) mencionó que generalmente se considera que el maíz fue una de las primeras plantas cultivadas por los agricultores entre 7 000 y 10 000 años. La evidencia más antigua del maíz como alimento humano proviene de algunos lugares arqueológicos en México donde algunas pequeñas mazorcas de maíz estimadas en más de 5 000 años de antigüedad fueron encontradas en cuevas de los habitantes primitivos. La diversidad genética del maíz a nivel mundial es amplia. Hay más de 250 razas clasificadas y se encuentran alrededor de 10,000 entradas almacenadas en los principales bancos de germoplasma a nivel mundial.

Kiesselbach (1949), Purseglove (1972), Fischer y Palmer (1984) describieron que el maíz es una monocotiledónea perteneciente a la familia Gramínea, Tribu Maydae, con dos géneros: *Zea* ($2n = 20$) y *Tripsacum* ($2n = 36$). El género *Zea* tiene además de la especie *Z. mays* (maíz común), cuatro especies conocidas como teosintes (*Z. mexicana*, *Z. luxurians*, *Z. diploperennis* y *Z. perennis*). Es una gramínea anual, robusta, de 1- 4 m de altura, determinada, normalmente con un solo tallo dominante, pero puede producir hijos fértiles, hojas alternas en ambos lados del tallo, pubescentes en parte superior y glabras en parte inferior, monoica con flores masculinas en panoja superior y flores femeninas en jilotes laterales; potándrica con la floración masculina ocurriendo normalmente 1- 2 días antes que la femenina, polinización libre y cruzada con exceso de producción de polen: 25 - 30 mil granos por óvulo, granos en hileras encrustados en la mazorca, en su totalidad cubierta por hojas; grano cariopsis; metabolismo fotosintético C4.

2.3. Características del maíz amarillo duro

- **Periodo vegetativo:** 150 días
- **Suelos:** Franco-limoso, Franco-arcilloso, Franco-arcilloso-limoso, exigentes en P y K.
- **Época de floración:** Desde Julio hasta Septiembre.
- **Densidad de siembra:** 71 000 plantas/ha
- **Sistema radicular:** fibroso, de buen desarrollo.
- **Tallo caña:** macizo, con nudos y entrenudos (sin macollos).
- **Hojas envainadoras:** con amplia y larga lámina ensanchada en su porción basal y bordes suavemente ondulados.
- **Planta diclina:** con inflorescencia masculina y femenina en el mismo pie.
- **Inflorescencia masculina:** como panoja terminal, formada por un eje central y ramificaciones. Es la productora de polen.
- **Inflorescencia femenina:** en espiga cilíndrica, ubicada axilarmente a la altura media de la planta (entre 1 y 1,30 m), con los granos dispuestos en hileras.

2.4. Fenología del maíz amarillo duro

La escala fenológica más utilizada para describir el ciclo de un cultivo de maíz es la de Ritchie y Hanway (1982), citado por Pearson y Hall (1984). En ella se puede distinguir dos grandes etapas, la vegetativa y la reproductiva (Tabla 1). Las subdivisiones numéricas de la etapa vegetativa, identificada con la letra V, corresponden al número de hojas totalmente expandidas. La etapa reproductiva comienza con la emergencia de los estigmas (R_1) y finaliza con la madurez fisiológica de los granos (R_6). Las subdivisiones de la etapa reproductiva corresponden a distintos momentos del llenado del grano. Simultáneamente a los cambios externos descritos por la escala de Ritchie y Hanway, el meristema apical y las yemas axilares también sufren modificaciones (Figura 1).

Cuando las plantas presentan entre cuatro a seis hojas completamente expandidas (alrededor de un cuarto a tercio del total de hojas) el meristema apical finaliza la diferenciación de hojas y comienza a diferenciar las espiguillas estaminadas correspondientes a la panoja (Stevens *et al.*, 1986). A esa altura del desarrollo queda determinado el número de hojas y, por lo tanto, el área foliar potencial que puede alcanzar la planta (Figura 1).

Tabla 1: Fases fenológicas del maíz

Estados Vegetativos	Estados Reproductivos
V _E Emergencia	R ₁ Emergencia de estigmas
V ₁ Primera hoja	R ₂ Cuaje (ampolla)
V ₂ Segunda hoja	R ₃ Grano lechoso
...	R ₄ Grano pastoso
...	R ₅ Grano pastoso
...	R ₆ Madurez fisiológica
V _n Enésima hoja	
V _T Panojamiento	

FUENTE: Ritchie y Hanway (1982).

Con posterioridad a la iniciación de la panoja, cuando la planta tiene alrededor de siete a nueve hojas, se produce el comienzo de la diferenciación de los primordios florales de la yema axilar que dará origen a la espiga. Si bien las yemas axilares se diferencian acrópetamente (es decir, las yemas más viejas son las basales), la primera cuyo meristema cambia de estado vegetativo a reproductivo es la yema superior; generalmente ubicada en la axila de la quinta a séptima hoja por debajo de la panoja (Dwyer *et al.*, 1992; citado por Dilley, 1997). Al igual que para el meristema apical, una vez que la yema axilar es inducida a diferenciar órganos florales, cesa la diferenciación de estructuras vegetativas, comenzando la formación de espiguillas con flores pistiladas. La diferenciación reproductiva de las yemas axilares continúa en sentido basípeto (Fischer y Palmer, 1984), pudiendo haber simultáneamente hasta siete yemas en estado de diferenciación floral. Las yemas correspondientes a las cuatro a cinco hojas basales, cuyos entrenudos nunca se elongan, permanecen en estado vegetativo y pueden dar lugar a ramificaciones (macollo), según el genotipo, el ambiente y la densidad de siembra. Las hojas ubicadas por encima de la correspondiente a la espiga superior, no presentan yemas axilares visibles.

La diferenciación de espiguillas sobre las hileras continúa hasta una a dos semanas antes de la aparición de los estigmas, fuera de la envoltura de las chalas. En el caso del maíz, a diferencia del trigo, la finalización de la diferenciación no se manifiesta por la formación de una espiguilla terminal, sino por un cambio en el aspecto del domo apical. Esto suele coincidir con el comienzo de la elongación de los estigmas de las espiguillas del tercio inferior de la espiga (Ruget y Duburcq, 1983; citado por Abookled y Alfaro, 1987). En ese momento queda determinado el total de espiguillas diferenciadas, y con ello el número

máximo de flores fértiles capaces de ser fecundadas, es decir, el número potencial de granos que puede tener la planta (Figura 1).

La elongación de los entrenudos se inicia alrededor de V_6 y continúa hasta la aparición de los estigmas. Alrededor del momento de floración también queda determinado el índice de área foliar máximo (las láminas de las hojas diferenciadas se hallan totalmente desplegadas) y la altura de las plantas (entrenudos completamente alargados; Figura 1). El orden de elongación de los entrenudos es acrópeto y normalmente hasta cuatro entrenudos se elongan simultáneamente (Morrison *et al.*, 1994; citado por Magrin *et al.*, 1997). A temperatura constante, la duración del periodo de elongación de cada entrenudo aumenta acrópetalmente (desde la base hasta el ápice) hasta el entrenudo correspondiente a la espiga, resultando cada entrenudo más largo que su inmediato anterior, excepto el entrenudo de la espiga. Este último presenta el mayor periodo de elongación pero es más corto que los dos adyacentes al mismo. La longitud de los entrenudos comienza a disminuir nuevamente a partir del inmediato superior a la espiga, aunque la máxima longitud nuevamente a partir del inmediato superior a la espiga, aunque la máxima longitud le corresponde al péndulo de la panoja (Morrison *et al.*, 1994; citado por Magrin *et al.*, 1997).

Las raíces seminales dejan de crecer antes de V_3 . A partir de V_E se desarrollan raíces nodales y partir de V_{18} , aparecen raíces en los nudos ubicados por encima de la superficie del suelo.



▲ EMERGENCIA	▲ APARICIÓN DE HOJAS	▲ PANOJA	▲ ESPIGA	▲ MADURACIÓN LECHOSA	▲ MADURACIÓN PASTOSA	▲ MADURACIÓN CÓRNEA
Aparición de las plantitas por encima de la superficie del suelo.	Comienza desde que aparecen las dos primeras hojas, debiéndose anotar como fase "dos hojas", y así sucesivamente de acuerdo al número de hojas que vayan saliendo hasta el inicio de la fase panoja.	Se observa salir la panoja de la hoja superior de la planta, sin ninguna operación manual que separen las hojas que la rodean.	Salida de los estigmas (barba o cabello de choclo), se produce a los ocho o diez días después de la aparición de la panoja.	Se ha formado la mazorca; y los granos al ser presionados presentan un líquido lechoso.	Los granos de la parte central de la mazorca adquieren el color típico del grano maduro. Los granos, al ser presionados, presentan una consistencia pastosa.	Los granos de maíz están duros. La mayoría de las hojas se han vuelto amarillas o se han secado.

Figura 1: Fases fenológicas del maíz

FUENTE: SENAMHI (2009)

El panojamiento consiste en la emergencia de la panoja (inflorescencia masculina), a través del cogollo formado por las hojas superiores, y se completa al expandirse la última hoja. Luego de la emergencia total de la panoja ocurre la antesis, que se define como la aparición de las anteras de las flores en las espiguillas de la panoja y el comienzo de la liberación del polen. Este fenómeno progresa en sentido basípeto: comienza en el eje principal y finaliza en las ramificaciones basales de la panoja. Esta maduración progresiva en el desarrollo floral de la panoja resulta en un periodo de varios días de liberación de polen, generalmente, solo por un día. La liberación del polen ocurre exclusivamente durante las horas de luz, con un máximo entre las 9 y las 11, para descender rápidamente hasta finalizar por completo a la puesta del sol (Bartolini, 1990; Otegui, 1992; citado por Castro, 2011).

La floración femenina, por su parte, consiste en la emergencia de los estigmas fuera de la envoltura de las chalas. Los estigmas de las flores que son fecundadas continúan creciendo hasta 15 días después de su aparición (Bassetti y Westgate, 1993a; Fischer y Palmer, 1984). La receptividad de los estigmas decae marcadamente a partir de los siete días de su aparición, tornándose nula a los 14 días de su emergencia (Sadras *et al.*, 1985; Bassetti y Westgate, 1993a-b; Cirilo y Andrade, 1994). Los estigmas de las flores no fecundadas se diferencian de aquéllos cuya base ha sido atravesada por el tubo polínico, porque no se desprenden del ovario aunque muestren síntomas de senescencia (Johnson y Herrero, 1981; Otegui *et al.*, 1995; citado por Lafite y Edmeades, 1996). La emergencia de los estigmas es también un proceso progresivo. Los estigmas de una espiga toman cuatro a ocho días en emerger, en una secuencia que sigue el patrón general de diferenciación y desarrollo de la inflorescencia (Bassetti y Westgate, 1993b; citado por Jones y Thornton, 2003).

El periodo de llenado de los granos transcurre desde el momento de la fecundación hasta la formación de una capa de abscisión en la base de los mismos, denominada “capa negra” (Daynard y Duncan, 1969; citado por Baigorria, 1996), resultante, esta última, de la necrosis de los haces vasculares que conectan con los tejidos maternos. El período de llenado del grano reconoce tres fases diferentes según su tasa de acumulación de materia seca. La primera coincide con el período de cuaje de los granos y presenta una muy baja tasa de llenado. Durante la misma tiene lugar una activa división celular, que da lugar a la formación de las células endospermáticas. La segunda fase, llamada de llenado efectivo el

grano o fase de crecimiento lineal, muestra la máxima tasa de llenado y suele representar más de la mitad del período total de llenado (Fischer y Palmer, 1984). La etapa final, de crecimiento no lineal, tiene una duración de una a dos semanas (Fischer y Palmer, 1984) y en ella la tasa de llenado declina progresivamente hasta hacerse nula, completándose el crecimiento del grano, el cual alcanza de madurez fisiológica. Este último período se caracteriza por una activa pérdida de humedad del grano. A la semana de completado el llenado se visualiza la formación de la capa negra, que pone en evidencia su madurez fisiológica. Al alcanzar la madurez fisiológica queda determinado el peso final del grano y, en consecuencia, el rendimiento en grano del cultivo.

2.5. Descripción del híbrido de maíz amarillo duro Dekalb 7088

Este híbrido fue desarrollado por la multinacional “Monsanto” para climas de tipo tropical. Es producido en Brasil y distribuido en el Perú por la empresa de agroquímicos “Hortus”, mediante bolsas con 60 000 semillas.

Este híbrido es de tipo simple, rústico y de alto potencial de rendimiento. Tiene una arquitectura de planta de hojas semi erectas, permitiendo una mayor entrada de luz y aire. Posee además una excelente calidad de grano y cobertura de mazorca. Es un material muy estable, que se adapta a diferentes valles y zonas agroclimáticas (Hortus, 2017). Bajo condiciones adecuadas de nutrición, clima y manejo puede llegar a producir hasta 12,72 t/ha, además según Ecuaquímica (2017) tiene tolerancia a enfermedades como: *Helminthosporium* (*Helminthosporium maydis*), mancha de asfalto (*Phyllachora maydis*), cinta roja (*Spiroplasma kunkelii*) y roya (*Puccinia polysora*). Las características agronómicas más resaltantes de este híbrido se pueden apreciar en la Tabla 2.

Tabla 2: Principales características del híbrido Dekalb 7088

Características	Valor o Calificación
Días de floración	54
Días a la cosecha	135
Altura de planta	2,32
Altura de inserción a mazorca	1,45
Cobertura a mazorca	Buena
<i>Helminthosporium</i>	Tolerante
Cinta roja	Muy tolerante
Mancha de Asfalto	Tolerante
Pudrición de mazorcas	Muy tolerante
Número de hileras por mazorca	16 - 20
Color de grano	Amarillo anaranjado
Textura de grano	Cristalino ligera capa harino
Relación tuza/grano	81/19
Potencial de rendimiento (t/ha)	12,72

FUENTE: Ecuaquímica (2017)

2.6. Requerimientos climáticos del maíz amarillo duro

2.6.1. Influencia de la temperatura

La temperatura es el elemento primario que influye sobre el desarrollo del maíz. Los cultivares se clasifican como de madurez temprana o tardía en base a sus requerimientos térmicos para cumplir ciertas etapas del desarrollo. El tiempo térmico es una medida de la temperatura acumulada por encima de un mínimo y por debajo de un máximo adecuados para el desarrollo. Las unidades de tiempo térmico son los grados-días. La floración es generalmente usada como el evento del desarrollo que caracteriza los cultivares como tempranos o tardíos.

Las principales regiones de producción de maíz en las zonas tropicales se caracterizan como ambiente de tierra bajas, de media altitud y de tierras altas. Si bien esta clasificación se basa en la altitud, el factor abiótico que las distingue es la temperatura. El maíz de tierras altas se caracteriza por crecer y desarrollarse a temperaturas más bajas que los cultivares adaptados a las tierras bajas o de media altitud. La temperatura óptima para el desarrollo del maíz en las tierras bajas y de media altitud está entre 30 y 34 °C, y se considera que para los maíces tropicales de tierras altas está alrededor de 21 °C (Ellis *et al.*,

1992; citado por Lafite y Edmeades, 1996). Los cultivares de tierras altas demoran en llegar a la floración casi el mismo tiempo que los cultivares de las tierras bajas en un ambiente cálido, pero florecen cerca de cuatro semanas antes en los ambientes fríos de las tierras altas. Las respuestas térmicas de los maíces de media altitud parecen ser similares a los de los cultivares de tierras bajas; esos tipos de maíz difieren sobre todo en sus reacciones a algunas enfermedades. Las temperaturas fuera del rango de la adaptación del cultivar pueden tener efectos negativos sobre la fotosíntesis, la translocación, la fertilidad de las florecillas, el éxito de la polinización y otros aspectos del metabolismo.

Según Ellis *et al.* (1992), citado por Dilley (1997), las diferencias en rendimientos de los cultivos en diferentes ambientes pueden ser explicadas por la duración del cultivo; cuanto mayor es el ciclo del cultivo, más radiación es interceptada, en áreas templadas con días largos y noches relativamente frescas, el potencial de potencial de rendimiento es considerablemente mayor que en áreas tropicales; en las tierras bajas de los trópicos de altas temperaturas nocturnas aceleran el desarrollo y al mismo tiempo, los días comparativamente cortos y las condiciones nubladas que por lo general prevalecen en la época lluviosa, limitan la cantidad de radiación que puede ser absorbida por el cultivo; estos factores resultan en una baja de cantidad de radiación absorbida por unidad térmica de tiempo y de ese modo limitan la producción del cultivo.

Norman *et al.* (1995), citado por Jones y Thornton, (2003), observaron una relación estrecha entre el número de granos de maíz en el momento de la cosecha y la tasa de crecimiento de las partes aéreas de la planta por unidad térmica de tiempo; en este estudio la tasa de crecimiento por unidad térmica de tiempo estaba presumiblemente relacionada a la radicación por unidad de tiempo térmico.

La cantidad de unidades térmicas de tiempo acumuladas por día es mayor en los años más cálidos pero la cantidad de radiación absorbida por días es menos afectada por la temperatura (Squire, 1990; citado por Sánchez, 1994); por lo tanto, las estaciones con temperaturas por encima de la media tendrán, a menudo, rendimientos por debajo de la media, por ejemplo, para un cereal C₄ como el maíz se estima que el rendimiento máximo será obtenido a una temperatura media de 20 °C a 22 °C.

Por otro lado, Squire (1990), citado por Sánchez (1994) menciona que las hojas transpiran libremente cuando la temperatura oscila entre 1 °C a 2 °C por debajo de la temperatura del aire evitando el daño a los tejidos, si la transpiración se reduce a causa de un cierre parcial de los estomas, la temperatura de la hoja puede llegar a ser de 3 °C a 6 °C superior a la temperatura del aire; y si el cierre de los estomas es total, la temperatura de la hoja puede ser hasta 10 °C más alta que la temperatura del aire, así mismo, concluye que la fotosíntesis disminuye a temperaturas de la hoja mayores de 40 °C, aparentemente a causa del daño a las membranas (fotoinhibición) y el daño es más severo en condiciones de alta radiación; en un principio esta fotoinhibición es reversible, pero los daños pueden ser irreversibles si la duración de las altas temperaturas es prolongada o si la temperatura de las hojas excede de 45 °C, llegando así en los casos extremos a la muerte de los tejidos.

Las altas temperaturas tienen un efecto directo sobre la polinización del maíz, ya que la viabilidad del polen se reduce en forma importante por encima de temperaturas de 35 °C; dado que el derrame del polen ocurre en las primeras horas del día, las temperaturas a esa hora difícilmente llegan a un nivel que pueda causar daño; sin embargo, si las altas temperaturas están asociadas a una baja humedad matinal, la viabilidad del polen se puede reducir de tal manera que la formación del grano puede ser afectada; en el caso en que el abastecimiento de polen viable descienda por debajo del 80 por ciento, la polinización puede ser una limitante del rendimiento (Westgate, 1994; Schlender y Roberts, 2010).

Muchow (1990) citado por Lafite y Edmeades (1996), concluye que las altas temperaturas después de la floración incrementan la tasa de llenado de los granos y acortan la duración de ese período; y el efecto es aún mucho mayor para el desarrollo y duración del tiempo de llenado del grano que para el crecimiento y la tasa del llenado del grano, por lo que el rendimiento es reducido por las altas temperaturas después de la floración; sin embargo, las altas temperaturas en el campo están asociados con períodos de poca lluvia y sequía, por lo que los efectos de la temperatura se confunden con los del estrés de agua.

El maíz es un cultivo sensible al frío y sufre daños a temperaturas entre 0 °C y 10 °C si está expuesto a la luz normal, y a temperaturas entre 10 °C y 15 °C cuando está expuesto a la luz intensa, dependiendo de los cultivares estudiados (Miedema, 1982; citado por Fischer y Palmer, 1984); así mismo, los efectos de las bajas temperaturas se manifiestan

tanto sobre las funciones enzimáticas como sobre las propiedades de las membranas, y se ponen en evidencia por la reducción de la fotosíntesis, del crecimiento, de la extensión de las hojas y por la absorción de agua y nutrientes.

2.6.2. Influencia del fotoperiodo

El maíz es una planta determinada cuantitativa de días cortos. Esto significa que el progreso hacia floración se retrasa progresivamente a medida que el fotoperiodo excede de un valor mínimo. En general, para la mayoría de germoplasma de maíz tropical el fotoperiodo crítico oscila entre 11 y 14 horas y en promedio 13,5 horas. La mayoría de los materiales tropicales tienen mucha sensibilidad al fotoperiodo que puede influir en el retraso en la iniciación de la espiga (Bolaños y Edmeades, 1993; citado por Baigorria, 1996).

El fotoperiodo también puede afectar el tiempo requerido por la floración. El maíz es clasificado como una planta cuantitativa de día corto. Después de un periodo juvenil insensitivo al fotoperiodo, la floración es demorada por fotoperiodos largos de más de 12,5 horas (Kiniry y Bonhomme, 1991). Hay variabilidad genética para la duración crítica del fotoperiodo por debajo de la cual la fecha de floración no es afectada. La mayoría de los cultivares tropicales son sensibles al fotoperiodo pero la extensión de esta sensibilidad varía enormemente, de uno a 12 días de atraso en las antesis por cada hora de extensión de la duración del día. Los cultivares para las zonas templadas tienden a ser más tempranos y también menos sensibles al fotoperiodo, lo cual les permite completar su ciclo en un tiempo relativamente más corto bajo las condiciones de días largos que caracterizan a los veranos de las zonas templadas.

2.6.3. Influencia de la radiación solar

La producción de los cultivos depende de la intercepción de la radiación solar y de su conversión en biomasa. La cantidad de radiación incidente que es interceptada por el cultivo está determinada por el área foliar, por la orientación de la hoja y por su duración. El índice del área foliar (IAF) es importante para determinar la intercepción de la radiación hasta un valor cercano a 4 en el caso del maíz; después de este valor, el área adicional tiene poco efecto en la intercepción de la luz. La densidad de siembra es un factor determinante del IAF y de la intercepción de la radiación. Los cultivares de ciclo corto producen menos

hojas para interceptar la radiación y requieren una mayor densidad de plantas para llegar a un rendimiento óptimo comparados con los cultivares tardíos.

La cantidad total de radiación interceptada a lo largo de todo el período de cultivo depende del tiempo requerido para alcanzar la intercepción máxima (o IAF máxima, si el cultivo no cubre completamente la tierra) y también de la duración del área verde de la hoja. Los factores experimentales que reducen la expansión de la hoja son el déficit de agua y la baja disponibilidad de nutrimentos. Por ejemplo, la fracción de radiación total interceptada en el período de cultivo fue de 0,46 en el caso de un híbrido tropical cultivado en siete ambientes con bajo contenido de nitrógeno comparado con 0,60 en un tratamiento con alto contenido de nitrógeno (Muchow y Sinclair, 1994; citado por García, 1998).

Hay una amplia y altamente heredable variación genética para el ángulo de inserción de la hoja del maíz; además, el impacto de la arquitectura de la capa de hojas de las plantas en la intercepción y uso de la radiación han merecido considerable atención. Los efectos simulados indican que las hojas superiores erectas combinadas con las hojas horizontales inferiores dan lugar a un uso más eficiente de la radiación por parte de la capa total de hojas. Es de esperar que la importancia de este efecto sea mayor en las zonas tropicales donde el ángulo de incidencia de los rayos solares es mayor (Pearson y Hall, 1984), pero también el efecto es menor en cultivos C4 como el maíz, comparado con cultivos C3 (Hay y Walker, 1989; citado por Oram, 1989). En el caso del maíz, la espata que cubre la mazorca contribuye a asimilar más materiales para la mazorca que otras hojas de la planta (Edmeades *et al.*, 1979). Las hojas erectas por encima de la mazorca permiten una mayor iluminación de las hojas que la recubren, obteniendo así un beneficio adicional de la arquitectura vertical de aquellas hojas. La iluminación de las hojas inferiores es importante para la continua absorción de nutrientes durante la etapa de llenado de los granos y también es favorecida por las hojas erectas en la parte superior de la planta (Andrade *et al.*, 1996; citado por Castro, 2011).

Según Norman *et al.* (1995) citado por Yzarra *et al.* (2010), el cultivo y el ambiente, tienen influencia directa sobre la eficiencia con la cual la radiación absorbida es utilizada (eficiencia de conversión, CE). El maíz presenta el proceso fotosintético C4 lo cual le proporciona el beneficio de la continua respuesta al incremento de la radiación hasta la

plena luz con bajos niveles de fotorespiración. Estas características son sumamente adecuadas a las altas temperaturas y a las altas intensidades de luz que se encuentran en las zonas tropicales. Otros factores ambientales con influencia sobre la CE son el agua y la disponibilidad de nutrientes (Tabla 3) así como también la temperatura (20 °C - 40 °C), irradiación (0 a completa luz solar). Las tasas máximas de fotosíntesis en el maíz tropical se encuentran entre 30 °C y 40 °C (Norman *et al.*, 1995; citado por Yzarra *et al.*, 2010). El efecto de la temperatura sobre la CE en el rango de 20 °C a 40 °C es relativamente pequeño, pero las temperaturas fuera del rango de adaptación del cultivar (por debajo de 15 °C o por encima de 44 °C para maíz tropical de tierras bajas) también pueden reducir la CE. La radiación diaria de onda corta en los trópicos varía de 10 MJ/m²/día en zonas nubosas a 25 MJ/m² /día en zonas semiáridas durante la estación seca.

Un maíz sin estrés sembrado a altas densidades puede interceptar alrededor de 55 por ciento del total de la radiación recibida en el período de cultivo. Se ha informado de eficiencias de conversión para cultivos de maíz sin estrés que van de 1,2 a 1,6 gramos de biomasa por encima de la superficie de la tierra por cada MJ de radiación solar interceptada (Muchow y Sinclair, 1994). Bajo buenas condiciones, en zonas templadas y sin estrés, el maíz puede crecer a razón de 500 kg/ha/día durante varias semanas, resultando así en una alta productividad (Norman *et al.*, 1995; citado por Yzarra *et al.*, 2010). En áreas tropicales con mayores temperaturas y días más cortos se han obtenido tasas de crecimiento de 250 a 350 kg/ha (Fischer y Palmer, 1984; Angus *et al.*, 1983).

Tabla 3: Algunos factores ambientales que afectan la eficiencia de conversión (CE) en el maíz tropical de zonas bajas

Factor	Rango de incremento lineal de CE	Umbral para nivel o declinación	Referencia
Temperatura	20 °C - 40 °C	40 °C - 44 °C	Fischer y Palmer, 1984; Hay y Walker, 1989
Irradiación	0 a completa luz solar	Visto a temperaturas < 15 °C	Hay y Walker, 1989
Contenido específico de N de la hoj	0,5 - 1,5 gm-2	> 1,5 gm-2	Muchow y Sinclair, 1994
Disponibilidad de agua	Niveles críticos dependientes de las precondiciones. Ciertos estudios informan que la declinación inicia a -0,35 MPa.		Fischer y Palmer, 1984

Bajo buenas condiciones, en zonas templadas y sin estrés, el maíz puede crecer a razón de 500 kg/ha/día durante varias semanas, resultando así en una alta productividad (Norman *et al.*, 1995). En áreas tropicales con mayores temperaturas y días más cortos se han obtenido

tasas de crecimiento de 250 kg/ha/día a 350 kg/ha/día (Fischer y Palmer, 1984; Angus *et al.*, 1983).

2.6.4. Requerimiento de agua

La disponibilidad de agua en cantidades idóneas al requerimiento de la planta posibilita que el cultivo pueda desarrollarse adecuadamente y potenciar su rendimiento; este requerimiento está en función del desarrollo fenológico de la planta y se correlaciona con otras variables muy importantes como la capacidad de campo, evapotranspiración y temperatura; asimismo, la cantidad de agua accesible al cultivo depende de la profundidad explorada por las raíces, de la cantidad de agua disponible hasta dicha profundidad y de la efectividad con que las raíces pueden extraer la humedad del suelo en los distintos niveles (Fuentes, 2002; citado por Castro, 2011).

Según Fuentes (2002), citado por Castro (2011), el cultivo del maíz dispone de una fase crítica que demanda la mayor cantidad de agua, este período ocurre durante la fase de pre y post-floración; una limitación de agua en esta fase puede afectar negativamente al rendimiento, debido al estrés que provoca en la fisiología de la planta; así mismo, la falta de agua en las plantas iniciales posterior a la siembra puede afectar significativamente la población de plantas, lo que causa la muerte de plántulas y por consiguiente pérdida de población que se reflejará en la disminución del rendimiento.

Heisey y Edmeades (1990), citado por Otegui (1992), observaron que el momento crítico de estrés de sequía de maíz se ubica entre los 7 días previos al inicio de la floración y 15 días posterior a esta; en esta etapa la reducción de rendimiento es mayor y puede ser 2 ó 3 veces mayor que en otra fase de crecimiento; así como también es esta fase el número de granos puede reducirse hasta en 45 por ciento.

El maíz necesita por lo menos 500 mm a 700 mm de precipitación bien distribuida durante el ciclo de cultivo; sin embargo, aun esa cantidad de lluvia no es suficiente si la humedad no puede ser almacenada en el suelo, debido a la poca profundidad de este o del escurrimiento, o si la demanda evaporativa es muy grande por las temperaturas elevadas y la escasa humedad relativa.

2.6.5. Requerimiento de suelo

De acuerdo a Lafitte y Edmiades (1994), el cultivo de maíz se desarrolla bajo diferentes condiciones de suelo, observándose la mayor dificultad de desarrollo del cultivo cuando los suelos son excesivamente pesados (arcillosos) y los muy sueltos (arenosos); los primeros por su facilidad a inundarse y los segundos por la tendencia a secarse excesivamente; sin embargo, las mejores condiciones se pueden encontrar en suelos con textura media (francos), fértiles, bien drenados, profundos y con elevada capacidad de retención del agua; así mismo, el maíz se puede cultivar con buenos resultados en suelos que presenten pH de 5,5 a 8, aunque el óptimo corresponde a una ligera aridez (pH entre 6 y 7); un pH fuera de estos límites suele aumentar o disminuir la posibilidad de ciertos elementos y se produce toxicidad o carencia; también se observa que con un pH inferior a 5,5 hay problemas de toxicidad por Al y Mn, con carencias de P y Mg; con un pH superior a 8 (o superior a 7 en suelos calcáreos) tiende a presentarse carencias de Fe, Mn y Zn.

El maíz es medianamente tolerante a los contenidos de sales en el suelo o en las aguas de riego; estas sales retrasan la nacencia de las semillas, sin afectar sus porcentajes de emergencia (un contenido de sales totales solubles de 0,5 por ciento en el suelo, o bien, 15,3 g/lit en la solución del suelo); se han observado que las plantas mueren cuando la concentración alcanza valores de 1,15 por ciento o 43 g/lit (Fuentes, 2002; citado por Castro, 2011).

2.7. Exposición general del problema de agua

El problema creado por el aumento de la población y el deseo de dar seguridad y un mayor nivel de vida en todas partes, han venido a enfocar la atención en forma cada vez más aguda, en los últimos años a cuanto se relaciona con la economía del agua. El efecto de esta atención ha sido y será, comprobar la urgencia de la construcción de obras para regular el aprovechamiento del agua en todo el mundo, lo que dará al ingeniero, al agricultor y al hidrólogo, oportunidades sin paralelo para poner sus conocimientos y su capacidad al servicio de la humanidad (Olivier, 1979; citado por Otegui, 1992).

El agua es factor esencial para la vida. Las necesidades del hombre para su consumo directo personal, a fin de asegurar su simple existencia, constituyen, sin embargo, solamente un pequeño porcentaje de las necesidades totales. El agua ejerce su principal

control sobre los destinos del hombre en combinación con el suelo. Son éstos los recursos naturales primordiales: la adecuada combinación del agua y el suelo, en el espacio y en el tiempo, establecerá los límites superiores de la capacidad de sostenimiento de población de la tierra.

La misión del ingeniero, desde un principio, ha sido el proceso de reunir agua y suelo, mediante la distribución del agua sobre las tierras en el espacio y en el tiempo. Como resultado de los vastos sistemas de riego de la India Británica (hoy en día, India y Pakistán) el ingeniero ha contribuido a aliviar el riesgo del hambre en el futuro. Como resultado de las obras de riego, Egipto y el Sudán han podido tener una buena producción de algodón. Egipto es quizá uno de los mejores ejemplos de la dependencia casi total de una población del uso de sus recursos hidráulicos. Numerosos monumentos visibles de ingeniería, relacionados con el aprovechamiento de los recursos hidráulicos, marcan el cambio del ascenso de América al pináculo que ocupa, respecto a los niveles relativos de vida. Puede decirse que ningún factor individual ha contribuido tanto al desarrollo económico del oeste de los Estados Unidos, como el aprovechamiento de sus recursos hidráulicos (Olivier, 1979; citado por Otegui, 1992).

Un estudio de las condiciones que prevalecen en el mundo, revela asombrosas diferencias en los niveles de vida; y revela también numerosos casos de desperdicio de los principales recursos naturales. El suelo se está erosionando y el agua se está perdiendo, mientras que el hombre y sus necesidades se multiplican prácticamente sin límite. ¡Estas son también las causas primarias de las guerras! (Olivier, 1979; citado por Otegui, 1992).

A lo largo de la historia, el hombre ha sabido convivir con un medio ambiente adverso, aprendió a desarrollar plantas y variedades adaptables a su medio. Ha concebido prácticas agronómicas idóneas en el manejo de cultivo como por ejemplo, uso eficiente del agua, los fertilizantes y pesticidas, de modo que le sea posible aumentar la producción agrícola. Pero, al disponer de agua en cantidades limitadas y al aumentar la población y sea necesaria una producción de alimentos mejor y más abundante, el agua ha pasado a ser el recurso natural más valioso en casi todas las regiones del mundo, por lo que resulta, absolutamente necesario llegar a una planificación realmente eficaz del agua en la producción agrícola (Madrid, 1986; citado por Parry, 1990).

En el Perú, la agricultura costeña de riego se orienta principalmente en el método de riego por gravedad; ya que tradicionalmente fue el método utilizado por los antepasados incaicos, los cuales lo perfeccionaron de acuerdo a su medio y necesidades. Otros métodos de riego moderno como: goteo, aspersión, microaspersión, etc. no están ampliamente difundidos en el territorio nacional. Son métodos nuevos en la agricultura peruana, que no se conocen su adaptabilidad a los medios de cultivo existentes en el país, estando éstos en fase de experimentación en muchas partes del territorio, pero que sus ventajas ya han sido demostradas en otros lugares del mundo (Madrid, 1986; citado por Parry, 1990).

Cualquiera que fuera el método de riego, el objetivo es aplicar agua al suelo, a partir del cual los cultivos obtendrán lo necesario para la producción de una cosecha, la que estará en función del planeamiento del riego y mientras esto sea más técnica se obtendrán mejores beneficios (Madrid, 1986; citado por Parry, 1990).

En la actualidad, la demanda de agua para regadío representa aproximadamente el 80 por ciento de los recursos hídricos disponibles en algunos países del sur de Europa, llegando hasta el 90 por ciento en determinadas cuencas hidrográficas (EEA, 2010; citado por Ecuaquímica, 2017). Concretamente, en el sureste español (Cuenca del Segura), la demanda de agua para riego agrícola alcanza el 87 por ciento de los recursos hídricos disponibles. Además, se da la circunstancia de que dichos recursos son sensiblemente inferiores al conjunto de demandas existentes, produciéndose un déficit estructural de agua permanente. Este déficit repercute básicamente sobre la agricultura, por tratarse del sector con mayor demanda y al que generalmente se dirigen las restricciones.

Asumiendo el interés socioeconómico y estratégico de mantener la importancia de la agricultura de regadío, el problema de escasez de agua para riego puede abordarse desde distintas perspectivas (Clayton, 2011; citado por INIA, 2012):

- El incremento de la eficiencia en la distribución y aplicación del agua de riego.
- El aprovechamiento mediante la reutilización de agua procedente de usos domésticos e industriales.
- La transferencia de recursos desde zonas excedentarias a zonas deficitarias.
- El desarrollo y aplicación de nuevas soluciones tecnológicas que permiten incrementar los recursos disponibles.

El crecimiento económico y poblacional que experimenta la sociedad peruana en los últimos años requiere de mayor disponibilidad de agua. Sin embargo, el agua tiende a ser cada vez más escasa con respecto a las zonas geográficas o territorios donde se expanden las actividades económicas y productivas, y donde también se incrementa la población. Este problema se ha hecho más grave en la costa peruana, ámbito de creciente expansión urbana y también de intensa actividad agrícola, esta última con un gran dinamismo orientado hacia la exportación (Muñoz, 2011; citado por INIA, 2012).

La preocupación por la escasez del recurso hídrico ha tomado mayor importancia internacional y nacional debido a las consecuencias derivadas del crecimiento de actividades productivas que son intensivas en el uso de agua. En efecto, el *Informe sobre Desarrollo Humano Perú 2009: Por una densidad del Estado al servicio de la gente* (PNUD, 2009) señala explícitamente que la escasez del agua en el Perú tiene como causas no solo la desigualdad en la distribución territorial del recurso, sino también aspectos físicos, climáticos y económicos.

El informe indica que el uso agrícola e industrial intensivo que se viene haciendo del agua contribuye a agravar la situación. Por su parte, y en términos globales, el Parlamento Europeo también ha señalado la importancia internacional del problema en un contexto de cambio climático (Anderson *et al.*, 2008; citado por Yzarra *et al.*, 2010).

En el territorio productivo, a veces se supone en forma mecánica que la escasez de agua es una condición que determina el desarrollo de la agricultura. A mayor escasez de agua, menor desarrollo de la agricultura. Sin embargo, autores como Golte han señalado que la escasez puede ser el resultado de una sobre-explotación del recurso. De acuerdo con este autor, en determinados contextos, escasez no es sinónimo de bajo desarrollo, sino por el contrario, de un gran desarrollo de la agricultura, en el que se usan las aguas en un grado extremo. En ese sentido, la escasez de agua en los valles de la costa es por lo general expresión de un desarrollo muy avanzado en la agricultura. Es decir, que la tecnología permite producir incluso en un medio en que la escasez de agua es dominante (Golte, 1980: 64-66; citado por García, 1992). Sin embargo, la situación de escasez se relativiza dependiendo del tipo de desarrollo imperante. Por ejemplo, si el desarrollo se basa en cultivos con alto requerimiento de agua, la escasez del recurso es más probable. Esto

quiere decir que la escasez estará vinculada no solo a la disponibilidad de agua, sino también al tipo y nivel de la producción.

2.8. Requerimiento hídrico de cultivos

Viene a ser la necesidad de agua de un cultivo para su desarrollo y crecimiento en condiciones óptimas de actividad fotosintética. Su valor puede evaluarse mediante la cuantificación de la evapotranspiración máxima (Em).

Estas necesidades de agua de los cultivos varían de una especie a otra y de una fase fenológica a otra. El conocimiento de estos requerimientos exige realizar estudios experimentales lisimétricos, en condiciones de tiempo y clima más diversificadas y con cada tipo de cultivo; de esa forma se podrá conocer la demanda máxima de agua por parte del cultivo en sus distintas etapas fenológicas así como durante el ciclo vegetativo completo, y además, estos estudios lisimétricos, permiten determinar experimentalmente el coeficiente de cultivo (Kc), parámetro muy importante en la práctica de aplicación de riego. En nuestro medio son muy escasos estudios en este campo y con ello la obvia limitación de cualquier control de riego y climatología (García, 1992).

Dirección General de Información Agraria (2010), citado por INIA (2012), la disponibilidad de agua en cantidades adecuadas al requerimiento de la planta, posibilita que el cultivo pueda desarrollarse adecuadamente y que posibilite potenciar el rendimiento. La utilización del agua está en función del desarrollo fenológico de la planta y se correlaciona con otras variables muy importantes como lo es la capacidad de campo, evapotranspiración y temperatura. La cantidad de agua accesible al cultivo en un momento dado depende de la profundidad explorada por las raíces, de la cantidad de agua disponible hasta dicha profundidad y de la efectividad con que las raíces pueden extraer la humedad del suelo en los distintos niveles.

En general, el cultivo del maíz dispone de una fase crítica que demanda la mayor cantidad de agua. Este periodo ocurre durante la fase de pre y post floración. La limitación de agua en esta fase puede afectar negativamente al rendimiento debido al estrés que provoca en la fisiología de la planta. También la falta de agua en las etapas iniciales posterior a la

siembra puede afectar significativamente la población de plantas, lo que causa la muerte de plántulas y por consiguiente pérdida de población que se reflejará en disminución del rendimiento. El efecto particularmente de la sequía afecta la habilidad de la planta de maíz a producir grano en tres fases críticas del crecimiento vegetativo: a) Al inicio del ciclo de cultivo, en estado de plántula puede matar a estas plantas y reducir la densidad de población; b) En fase de floración y c) en fase de llenado de grano. Se han realizado diferentes estudios en maíces tropicales para simular y cuantificar potencialmente el efecto de la reducción del grano por efecto de sequía. La reducción de agua en el cultivo del maíz durante el período de prefloración, floración y post-floración provoca pérdidas de 25 por ciento, 50 por ciento y 21 por ciento, respectivamente. Heisey y Edmeades (1999), citado por Injante (2013), informan que el momento crítico de estrés de sequía de maíz se ubica entre los 7 días previos al inicio de la floración y 15 días posterior a esta. En esta etapa la reducción de rendimiento es mayor y puede ser 2 ó 3 veces mayor que en otra fase de crecimiento. Se indica también que en esta fase el número de granos puede reducirse hasta en 45 por ciento. El umbral mínimo de precipitación desde el cual puede esperarse cosecha de granos es de 150 mm.

Según Lafite y Edmeades (1994), el maíz necesita por lo menos 500 a 700 mm de precipitación bien distribuida durante el ciclo de cultivo. Sin embargo, aun esa cantidad de lluvia no es suficiente si la humedad no puede ser almacenada en el suelo debido a la poca profundidad de éste o del escurrimiento, o si la demanda evaporativa es muy grande por las temperaturas elevadas y la escasa humedad relativa.

Para Martin (2012), el maíz, igual que el sorgo, posee el mecanismo de que bajo situaciones de deficiencia hídrica, su sistema radicular aumenta la velocidad de exploración en profundidad; esto le permite posponer temporalmente su marchitez. Otro mecanismo de regulación de la pérdida de agua por transpiración, es el acartuchamiento de sus hojas, el que no llega a ser tan pronunciado como el sorgo. El agua del perfil del suelo es mucho más accesible en los primeros 20 a 30 cm cuando no hay deficiencia hídrica. A medida que el suelo se va secando (comienza el secado por la superficie), el cultivo se ve obligado a extraer agua de capas cada vez más profundas; esto le exige cada vez mayor presión osmótica, la que llegado a un punto en que ya no le es posible sacar agua del suelo, la planta se encuentra en “punto de marchitez”, aunque aún quede agua residual en el

perfil. En general, los requerimientos hídricos mínimos del maíz durante su ciclo son de 500 mm, con niveles óptimos de alrededor de 800 mm.

Las necesidades de agua varían con el estado fenológico:

- De VE a V₆ la planta se instala en el terreno y desarrolla su aparato radicular; la cantidad de biomasa que debe mantener es todavía pequeña y las necesidades de agua y minerales son bajas.
- De V₆ a V₁₀ la consistencia de la parte aérea es mayor y se elongan los nudos y entrenudos; las necesidades de agua se incrementan progresivamente.
- De V₁₀ a R₁ (floración), el ápice vegetativo experimenta importantes transformaciones para tomar la panoja y 8 a 10 días después, la espiga; en esta etapa el crecimiento de las partes aéreas y subterráneas del maíz son muy rápidas. Este es el periodo con mayores requerimientos de agua, no debiendo sufrir déficit hídrico el cultivo desde 20 días antes de la floración y hasta 20 a 30 días después de finalizada la misma.
- De R₂ a R₅ (etapas de llenado de grano), las necesidades hídricas van siendo progresivamente decrecientes. Entre R₂ y R₃ el cariopse incorpora alta proporción de agua junto con las sustancias de reserva; a partir de R₄ el grano comienza un proceso de desecación hasta hacer nula la necesidad de agua en R₆ (madurez fisiológica).

Si hay sequía en etapas vegetativas, la planta reduce el crecimiento foliar, la RFA (Radiación Fotosintéticamente Activa) interceptada y presenta menor altura, IAF (Índice de Área Foliar) y peso de biomasa, que una planta bajo régimen hídrico normal.

Si la sequía es en etapas reproductivas (alrededor de la floración), hay reducción en la eficiencia de conversión de la RFA en biomasa, menor número de espigas/planta, menor número de granos/espiga y mayor número de granos abortados.

Si la sequía ocurre en etapas tempranas del llenado de grano, se acelera la senescencia foliar y se reduce el peso del grano. Como el proceso de llenado del grano se hace mediante la translocación de los hidrocarburos de reserva acumulados en el tallo, hacia la

espiga, puede darse que al escasear masa foliar fotosintéticamente activa, el vaciado de los tallos aumente el porcentaje de vuelco de plantas. Un cultivar o híbrido resistente a sequía debe tener: A) estabilidad de rendimiento ante diferentes condiciones climáticas; B) corto intervalo de tiempo entre polen y estigmas femeninos; C) panoja chica y poco ramificada; D) alta prolificidad; E) tamaño reducido de planta y F) menor umbral de tasa de crecimiento mínima para producir grano.

2.9. El maíz amarillo duro a nivel nacional

2.9.1. Principales indicadores de la actividad de maíz amarillo duro

El maíz amarillo duro es el tercer cultivo en importancia a nivel nacional y tiene una relevancia fundamental debido a que forma parte de la cadena de maíz amarillo duro, avicultura, porcicultura, la cual es la más importante en términos de la actividad económica y social para el país; hasta el segundo trimestre del 2017, el Perú produjo 284 567 toneladas, con una superficie cosechada de 54 227 hectáreas, rendimiento promedio nacional de 14,8 t/ha, tal como lo señalado en la Tabla 4.

Tabla 4: Producción y superficie cosechada en el Perú

Región	Cosecha (ha)	Producción (t)	Rendimiento (kg/ha)
Nacional	265,128	1,249,600	4,713
Ica	23,846	223,834	9,387
Lima	19,173	178,830	9,327
Ancash	18,605	138,139	7,425
La Libertad	16,158	138,086	8,546
Loreto	37,817	110,878	2,932
San Martín	43,039	91,825	2,134
Lambayeque	12,453	83,428	6,699
Piura	16,608	61,767	3,719
Cajamarca	15,860	55,550	3,503
Huánuco	11,325	43,833	3,871
Ucayali	13,612	33,232	2,441
Amazonas	11,793	27,538	2,335
Junín	5,942	20,779	3,497
Madre de Dios	5,951	15,516	2,607
Otros dptos	12,946	26,367	2,037

FUENTE: Direcciones Regionales de Agricultura (2017)

2.9.2. Producción nacional

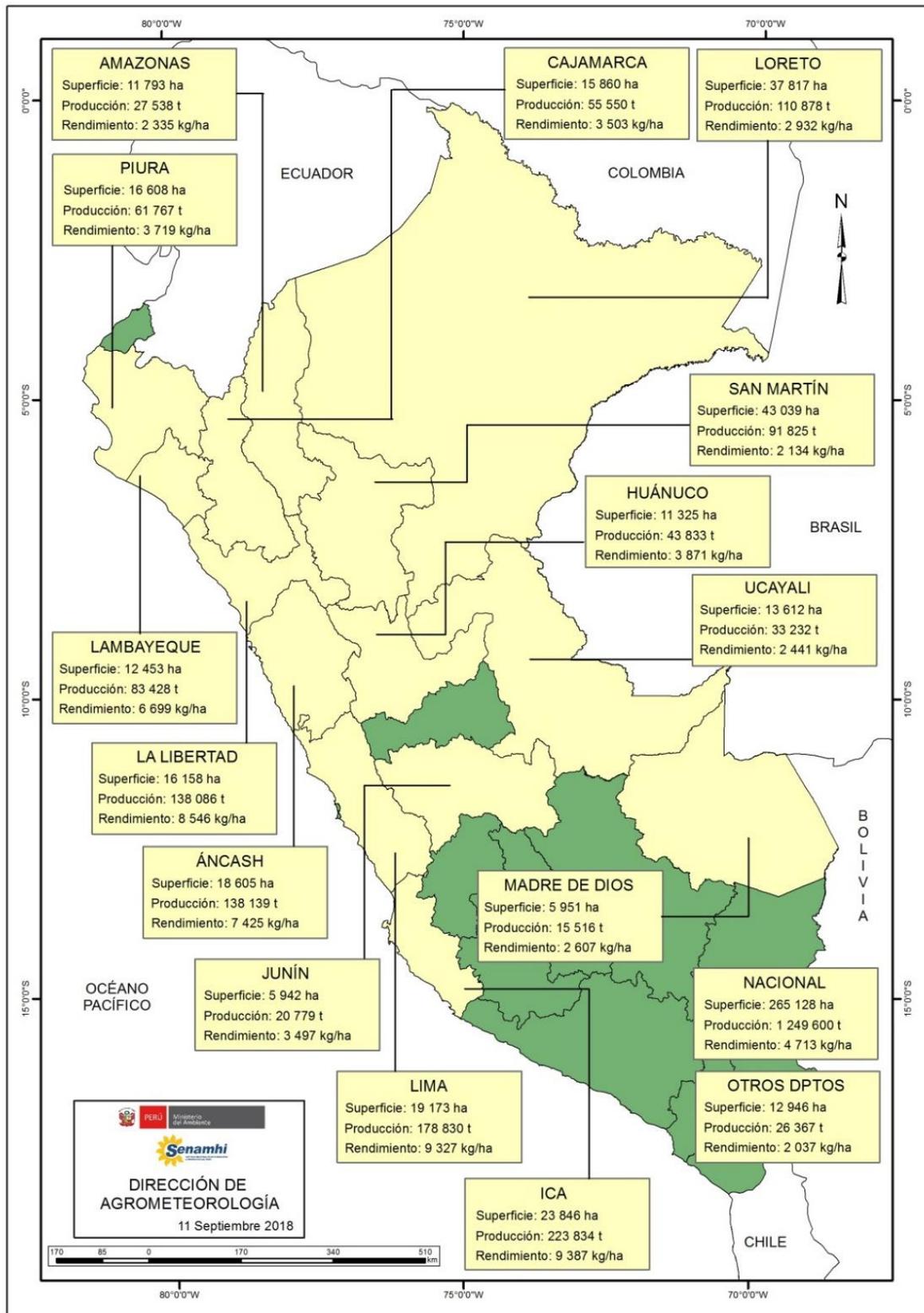


Figura 2: Principales zonas productoras de maíz amarillo duro. Año 2017.

2.10. Evapotranspiración

La evapotranspiración es la pérdida de agua hacia la atmósfera, por evaporación desde cualquier superficie evaporante (suelos húmedos, superficies de agua, etc.) y transpiración de la vegetación (campos de cultivos, bosques, praderas, etc.) existente en dicha superficie o medio (García, 1992).

2.10.1. Evapotranspiración actual o real (E)

Es la que realmente ocurre desde superficies húmedas con vegetación. En ello se incluye la evaporación desde suelos húmedos y la transpiración a través de las plantas. Los factores que regulan este proceso son:

- a. Disponibilidad de agua.
- b. Estado de desarrollo (crecimiento) y cobertura de vegetación.
- c. Naturaleza y tipo de suelo.
- d. Elementos climáticos tales como:
 - Radiación (R_n).
 - Viento.
 - Gradiente vertical de humedad.
 - Temperatura del aire.
- e. Temperatura de la superficie evapotranspirante.

En términos de cultivos, la evapotranspiración, es definida como la pérdida de agua desde campos de cultivo en cualquier instante, independiente de su estado de desarrollo y bajo las condiciones climatológicas reinantes. En ciertas circunstancias es igual a la evapotranspiración potencial (García, 1992).

El conocimiento de la evapotranspiración real es de suma importancia, ella permite establecer con la evapotranspiración potencial un índice muy importante para la planta, conocido como índice de rendimiento vegetativo. Se menciona que cuanto más próximo a la unidad sea su valor, la planta se encuentra más próxima a las condiciones ideales de su crecimiento y desarrollo. Esto indica la importancia de conocer este índice (García, 1992).

2.10.2. Evapotranspiración potencial (E_o)

Representa la evapotranspiración que ocurriría desde una superficie muy extensa completamente húmeda cubierta de plantas, esto es, una superficie con suministro continuo de agua. Depende mayormente del elemento climático, Radiación Neta. El viento así como la humedad del aire, son de importancia limitada, dada la gran extensión de la superficie evaporante. Dada la disponibilidad adecuada de agua, el tipo de suelo, prácticas de manejo de tierra y contenido de humedad del suelo son también de importancia secundaria (García, 1992).

En términos de cultivos es definida como la pérdida de agua desde extensos campos de cultivo en su estado de crecimiento y desarrollo intenso, con el suelo sin déficit de agua, o sea, teniendo el suelo un potencial matricial próximo a -0.6 atmósferas (-62 cm de columna de agua).

Estas definiciones indican que la evapotranspiración potencial constituye la máxima cantidad de agua que puede pasar a la atmósfera. Sin embargo mediciones realizadas con evapotranspirómetros y lisímetros (evapotranspiración real con agua disponible) indican que no siempre la E_o es mayor que la evapotranspiración real (E) 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” (García, 1992).

2.10.3. Evapotranspiración máxima (E_m)

Cuando el suelo de un campo de cultivo se mantiene sin déficit de agua, la evapotranspiración real alcanza un valor más alto la cual es denominada Evapotranspiración máxima (E_m), más debemos tener presente que la E_m depende de tipo de cultivo y etapas fenológicas de éste (alcanzando sus valores más altos, justamente, en el desarrollo y crecimiento intenso) (García, 1992).

2.11. Lisímetros

Los lisímetros son dispositivos formados por un tanque con área de 4m^2 como mínimo y pudiendo alcanzar hasta 10m^2 , su profundidad depende del cultivo, más lo ideal es de 1 a 1.2m sobre todo para cultivos anuales; al llenarse el recipiente se inicia con una capa de

cascajo, otra de arena fina y luego es colocado el suelo obedeciendo las capas del perfil del mismo. En el tanque así constituido se siembra un cultivo cuya pérdida continua de agua se desea conocer. El dispositivo constituido de esta forma es el lisímetro que nos permite conocer la evapotranspiración real, la cual en el caso que no existe restricción de humedad, constituye la evapotranspiración máxima (E_m) (García, 1992).

Velasco (1979) sostiene que la principal ventaja de los lisímetros, es su adaptabilidad para obtener información de cultivos que desarrollan bajo condiciones de una tabla de agua alta. El grado de confianza de los datos depende de la fidelidad con que se han reproducido las condiciones naturales. Recomienda instalar los lisímetros dentro de campos con vegetación similar a las que éste contiene, de modo que, el cultivo exterior rodee totalmente al instrumento. Esto asegurará condiciones de exposición y por tanto de recepción de radiación, análogas a las existentes en condiciones de campo.

A continuación, se tienen algunas consideraciones para la instalación de los lisímetros por Abookled y Alfaro (1987):

- El lisímetro debe ser amplio y profundo para permitir un buen desarrollo radicular.
- Las condiciones físicas del suelo y cultivo dentro del lisímetro, deben ser las mismas que aquellas que la rodean.
- Los lisímetros deben ser instalados en las zonas próximas a una estación meteorológica y dentro de campos cultivados uniformemente.
- Las paredes de los lisímetros deben ser en lo posible lo mínimo en espesor, para evitar de esta manera el “efecto de borde”, que consiste en la transferencia de calor a través de las paredes de los lisímetros ocasionando alteraciones en los resultados.

2.12. Eficiencia de uso de agua

Según Medrano *et al.* (2008), la eficiencia en el uso del agua (EUA) de las plantas puede entenderse de manera genérica como el volumen de agua que éstas necesitan consumir (evapotranspirar) para incorporar a su biomasa una determinada cantidad de carbono proveniente de la atmósfera (en la que se encuentra en forma de CO_2).

De esta manera, la eficiencia en el uso del agua de las plantas dependerá principalmente de dos tipos de factores: en primer lugar, de aquellas características propias de la especie y variedad que tengan relación con la capacidad de optimizar de los procesos de asimilación de carbono y de evapotranspiración de agua; y en segundo lugar, de las características del ambiente en el que crece y se desarrolla la planta (Medrano *et al.*, 2008; citado por Yzarra, *et al.*, 2010); por otra parte señalan, que la eficiencia en el uso del agua puede ser considerada a escala de cultivo o de ecosistema, a escala de planta entera y a escala de hoja; además del nivel de organización considerado, la escala temporal, esto es el periodo de tiempo que se considera en la medida de la EUA, añade complejidad tanto a la medida como a la interpretación fisiológica y ecológica de este parámetro.

Fernández y Camacho (2005), citado por Yzarra, *et al.* (2010), entienden por EUA la relación existente entre la biomasa presente en un determinado momento en un cultivo y la unidad de agua utilizada por este; cuando se trata de analizar fisiológicamente el uso del agua que ha realizado una planta o unidad de superficie se emplea como numerador dentro de este ratio la biomasa total (B), mientras que cuando se pretende enfocar el uso del agua con un componente productivo y económico se recurre a sustituir la biomasa por el rendimiento (Y). Donde, para ambos casos, la $EUAB=B/ET_c$ ó $EUAY=Y/ET_c$.

Para la costa central del Perú, Villareal (2006), citado por Yzarra, *et al.* (2010), encontró una eficiencia de uso de agua para producción de materia seca total promedio de 2,1 g/l, para un rendimiento promedio de 8 856,9 kg/ha a 9 893,2 kg/ha de rendimiento de maíz.

Fuenzalida *et al.* (1993), citado por Baigorria (1996), para un promedio de 4 experimentos con maíz en Chile, encontraron valores promedio de EUA de 5,72 g/l y con valores máximos de EUA en los períodos de mayor tasa de crecimiento foliar; asimismo, la EUA global del cultivo resultó muy estable al comparar varios híbridos que crecieron en ambientes climáticos distintos (fechas o temporadas), por lo que su utilidad como variable predictora del crecimiento y del consumo de agua del maíz resulta apropiada, cuando se dispone de antecedentes sobre la demanda por evapotranspiración de una localidad.

Según Micucci (2007), citado por Martin (2012), para cultivo de maíz en Argentina, hace

referencia a valores de EUA entre 0,9 g/l a 2,99 g/l en diferentes híbridos de maíz, sin y con prácticas de manejo y diferentes tipos de suelo, y con rendimiento de granos variando entre 3800 kg/ha a 11 153 kg/ha.

2.13. Observaciones biológicas y fenológicas

Las observaciones fenológicas son las observaciones de las manifestaciones de las plantas o animales; manifestaciones que surgen como consecuencia de su relación con el tiempo y clima reinante en su hábitat.

Las condiciones del tiempo en el hábitat del ser vivo están en un cambio continuo en diferentes intensidades. Estos cambios producen diversas reacciones en el organismo del ser vivo y en relación directa a la magnitud o intensidad de dichas variaciones. Las manifestaciones del ser vivo se dan en muchas formas, tales como aparición de plantas, aparición de brotes; el canto de las aves, etc. Esto indica que las observaciones biológicas, son muchas (García, 1988).

Observación fenológica puede entenderse como la observación de las manifestaciones biológicas de plantas cultivadas y/o animales domésticos en cada una de sus distintas fases. (García, 1988).

2.13.1. Fases fenológicas

Es el conjunto de subperíodos en los que se subdividen el período vegetativo o ciclo biológico de las plantas. Donde cada subperíodo se denomina fase (García, 1988).

Fase: Es el período durante el cual aparecen, se transforman o desaparecen los órganos de las plantas. También, puede entenderse como el tiempo de duración de una manifestación biológica en las plantas (García, 1988).

2.13.2. Momentos fenológicos de la fase

Son las etapas por las que pasa una fase. Es el período de tiempo que requiere la planta para alcanzar la evolución (pasando por varias etapas) de cada una de sus distintas fases.

En cada fase se distinguen, los momentos fenológicas de inicio de fase (a), plenitud de fase (b) y fin de fase (c).

a. Inicio de Fase

Para cultivos densos (al boleó), se reconoce por la aparición o presencia de los órganos y seguidos por otros, pero en una sucesión constante (sin interrupción) y en número ascendente.

Para cultivos en surco con distanciamiento entre planta y planta, se reconoce por la aparición de los órganos de la fase en consideración en un porcentaje (20%) de individuos o plantas.

b. Plenitud de Fase

En cultivos densos se reconoce como el momento en la cual el fenómeno o aparición de órganos ha alcanzado su intensidad máxima y que puede ser estimado visual y cualitativamente. El momento o día corresponde a aquel donde aparecieron el mayor número de órganos comparados con los aparecidos en días anteriores y los que aparecieron en los días posteriores.

Para cultivos en surco con distanciamiento entre planta y planta, se reconoce por la aparición de los órganos de la fase en consideración en un porcentaje (50% de individuos o plantas).

c. Fin de Fase

Para cultivos de siembra al boleó se reconoce por la aparición del cultivo de los órganos de la fase sin interrupción de la continuidad del proceso. Esto corresponde al día donde el proceso finaliza su continuidad. En cultivos distanciados, se toma el día en la que un 80 por ciento de los individuos poseen los órganos de la fase en consideración (García, 1988).

2.14. Coeficiente de cultivo (Kc)

El Kc permite calcular el consumo de agua o evapotranspiración real de un cultivo en particular a partir de la evapotranspiración de referencia (ETr) a través de:

$$ETc = Kc * ETr.$$

Donde:

- ETc: Evapotranspiración del cultivo (mm)
- Kc: Coeficiente del cultivo (adimensional)
- ETr: evapotranspiración de referencia (mm)

III. METODOLOGÍA

3.1. Ubicación del área experimental

La parcela experimental se ubicó en los campos experimentales del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), departamento de Lima, distrito de la Molina, cuyas coordenadas geográficas son las siguientes:

Latitud: 12° 4' 28.73"

Longitud: 76° 56' 42.76"

Altitud: 245 m

Se sembró el híbrido DK7088 el día 01 de setiembre de 2015.

3.2. Materiales y equipos

- Semillas de maíz amarillo duro tipo DK7088.
- Balanza digital.
- Picos y lampas.
- Estufa.
- Una rejilla de cobertura con marco de madera y reticulado o malla de pabilo, con 0.35m * 1.45m de dimensiones del marco.
- Lisímetro de nivel freático constante: estará conformado por tres tanques de fibra de vidrio: Tanque alimentador, tanque controlador del nivel freático y el tanque del cultivo.

3.3. Datos climáticos

Los datos climáticos: temperatura del aire, radiación solar y humedad relativa fueron obtenidos de la estación automática del SENAMHI ubicada en las mismas coordenadas del área experimental; y los datos de pérdida continua de agua que pasan a la atmósfera fueron obtenidos de forma diaria tomados durante el periodo del cultivo.

3.4. Metodología

3.4.1. Determinación de la demanda hídrica del cultivo de maíz

El requerimiento hídrico del cultivo, es la necesidad de agua de la planta, esto es, la cantidad total de agua que puede utilizar cuando el suelo está en condiciones óptimas de humedad. La necesidad de agua del cultivo es variable, varía en las distintas etapas de desarrollo del cultivo, del ciclo vegetativo, de lugar a lugar (condiciones climáticas) y de cultivo a cultivo. La determinación de estos requerimientos en las distintas etapas de desarrollo del cultivo se realizó directamente totalizando las lecturas diarias del lisímetro. Luego una vez determinados los requerimientos de cada etapa, la demanda hídrica total del cultivo se obtiene sumando los requerimientos de cada etapa. Las lecturas del lisímetro son expresadas en lámina de agua evapotranspirada mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}V_c &= V_a \\A_{(c)} * E_m &= A_{(a)} * h \\ \pi r_{(c)}^2 * E_m &= \pi r_{(a)}^2 * h \\ \pi (d_{(c)}/2)^2 * E_m &= \pi (d_{(a)}/2)^2 * h \\ E_m &= (d_{(a)}/d_{(c)})^2 * (h) \text{ ml}\end{aligned}$$

Considerando los diámetros se tiene:

$$E_m = 0.1992 * (h) \text{ ml}$$

Considerando que 10 ml de la pipeta equivale a 59.066 mm, se tiene:

$$E_m = 1.1766 * (h)$$

Dónde:

V_c : Volumen del agua que sale por el tanque de cultivo.

V_a : Volumen del agua que perdió el tanque alimentador.

$A_{(c)}$: Área evapotranspirante del lisímetro.

$A_{(a)}$: Área de la base del tanque para alimentar agua al sistema.

E_m : Evapotranspiración Actual o Real máxima.

$h = (I_f - I_i)$ = Lámina de agua que perdió el tanque alimentador. Cuyo valor está dado por la

diferencia de la lectura final (I_f) y la lectura inicial (I_i).

$d_{(c)} = 114.64 \text{ cm}$ = Diámetro superior interno del tanque de cultivo.

$d_{(a)} = 51.16 \text{ cm}$ = Diámetro interno del tanque para alimentar agua al sistema.

Teniendo en cuenta que los lisímetros no siempre se tienen y que la demanda de agua de los cultivos se estima con la expresión: $E_m = E_o * K_c$. En esta tesis, adicionalmente, se optó por estimar el requerimiento hídrico con el método Penman Monteith y Penman Modificado, mediante las siguientes expresiones:

- Método Penman Monteith

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma 900/(t + 273)u_2(es - ea)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

ET_o : Evapotranspiración de referencia (mm/día)

Rn : Radiación neta ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{día}$)

G : Flujo del calor de suelo ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{día}$)

T : Temperatura media del aire a 2m de altura ($^{\circ}\text{C}$)

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

e_s : Presión de vapor de saturación (kPa)

e_a : Presión real de vapor (kPa)

$e_s - e_a$: Déficit de presión de vapor (kPa)

Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$)

γ : Constante psicométrica ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$)

- Método Penman Modificado

$$ET_o = \frac{\left[\left(\frac{m * e_s}{PT^2}\right) * Rn + Ea\right]}{\left[\left(\frac{m * e_s}{PT^2}\right) + 1\right]}$$

ET_o : Evapotranspiración Potencial (mm/día)

m : $8.03 * 10^6$ ($^{\circ}\text{K}^2$)

e_s : Presión de vapor de saturación (mb)

- P : Presión Atmosférica del lugar (hPa)
- T : Temperatura del aire (°K)
- Rn : Radiación Neta (mm/día)
- Ea : Término Aerodinámico (mm/día), algunas formas de este término son los siguientes:
- $Ea = 0.1118 + 0.1469 E$, según Stabhill (1962)
- $Ea = 0.28 E$, según Ometto (1981)
- $Ea = 0.26 (1 + Ct.U) (e_s - e)$ (mm/día), según Oldeman y Frere (1982)
- $Ea = 0.35 (1 + U/100) (e_s - e)$ (mm/día), con U (m/s) y e (mb), según Cocheme y Franquin (1987)
- $Ea = 0.35 (1 + 0.526U) (e_s - e)$ (mm/día), con U (m/s) y e (mmHg), según Ometto (1981)
- $Ea = 0.27 (1 + 0.54U) (e_s - e)$ (mm/día), con U (m/s) y e (mb), según Fulachi y otros (1985)
- $0.35 (1 + U/160) (e_s - e)$ (mm/día), con U (km/día) y e (mmHg), según Martinelli (1986)

Donde:

E = evaporación de evaporímetro de Piché (mm/día)

Ct = constante que depende del rango diario de temperatura

U = velocidad del viento a 2m sobre el suelo. .

a. **Instalación del lisímetro de nivel freático constante**

El tipo que se utilizó estuvo conformado por tres tanques de fibra de vidrio: Tanque alimentador, tanque controlador del nivel freático y el tanque del cultivo o lisímetro.

El lisímetro o tanque con cultivo que se utilizó en el experimento, tiene un diámetro de 1.154 m y una profundidad de 1.20 m; el tanque controlador del nivel freático contiene una boya para controlar el nivel de agua; y el tanque alimentador, diámetro de 51.5 cm, suministra agua al sistema y lleva anexo una pipeta que constituye el sistema de lectura. El tanque del cultivo se ubicó en la parte central del campo de cultivo enterrado a nivel del suelo.

Luego se llenó el recipiente comenzando con una capa de canto rodado, luego una capa de confitillo y otra capa de piedra chancada y finalmente se colocaron el suelo de acuerdo a las capas del perfil del suelo. El suelo dentro de este sistema fue mantenido en condiciones óptimas de humedad a través del tanque de nivel freático (una boya controla el nivel de agua, la cual se sitúa dentro de un tanque de agua que es componente del dispositivo).

b. Calibración del lisímetro

Calibrar el lisímetro consistió en poner y/o dejar en condiciones óptimas de humedad el suelo del tanque de cultivo, para ello es necesario realizar la toma de muestra correspondiente a las profundidades de la raíz (15, 25 y 35 cm) para que esta tenga una humedad igual a la humedad de capacidad de campo. Para tal propósito se realizó lo siguiente:

- Se inundó con agua un área 1.5m². Terminada la inundación, se cubrió con plástico para evitar la pérdida de agua por evaporación desde la superficie. Después de 72 horas se retiró la cubierta procediendo en seguida a sacar muestras para determinar la humedad de dicho suelo.
- Se realizó el muestreo en el suelo del lisímetro en varias fechas y en las mismas profundidades adoptadas, subiendo o bajando el tanque controlador del nivel freático, hasta obtener en la capa de interés una humedad similar a la humedad de capacidad de campo del campo experimental.

c. Siembra

En el campo experimental, se sembró el maíz amarillo duro tipo “DK-7088” el 01 de setiembre del 2015 con distanciamiento de 1.45m entre surco y surco, y 0.35m entre planta y planta. Además, en la parte central del área experimental se instaló un lisímetro, de nivel freático constante, con cultivo de maíz de la misma variedad. Se aplicaron fertilizantes a los 13 y 78 días después de la siembra, las proporciones de nitrógeno, P₂O₅ y K₂O se aprecian en la Tabla 5.

Tabla 5: Fertilizaciones realizadas en la parcela experimental

Fecha de fertilización	Días después de la siembra	Tipo de fertilizante	N(kg/ha)	P2O5 (kg/ha)	K2O (kg/ha)
13/09/2015	13	Úrea	120	0	0
13/09/2015	13	Sulfato de Potasio	0	0	100
13/09/2015	13	Superfosfato Triple de Calcio	0	100	0
17/11/2015	78	Úrea	120	0	0



Figura 3: Perfil vertical del contenido sólido del lisímetro.

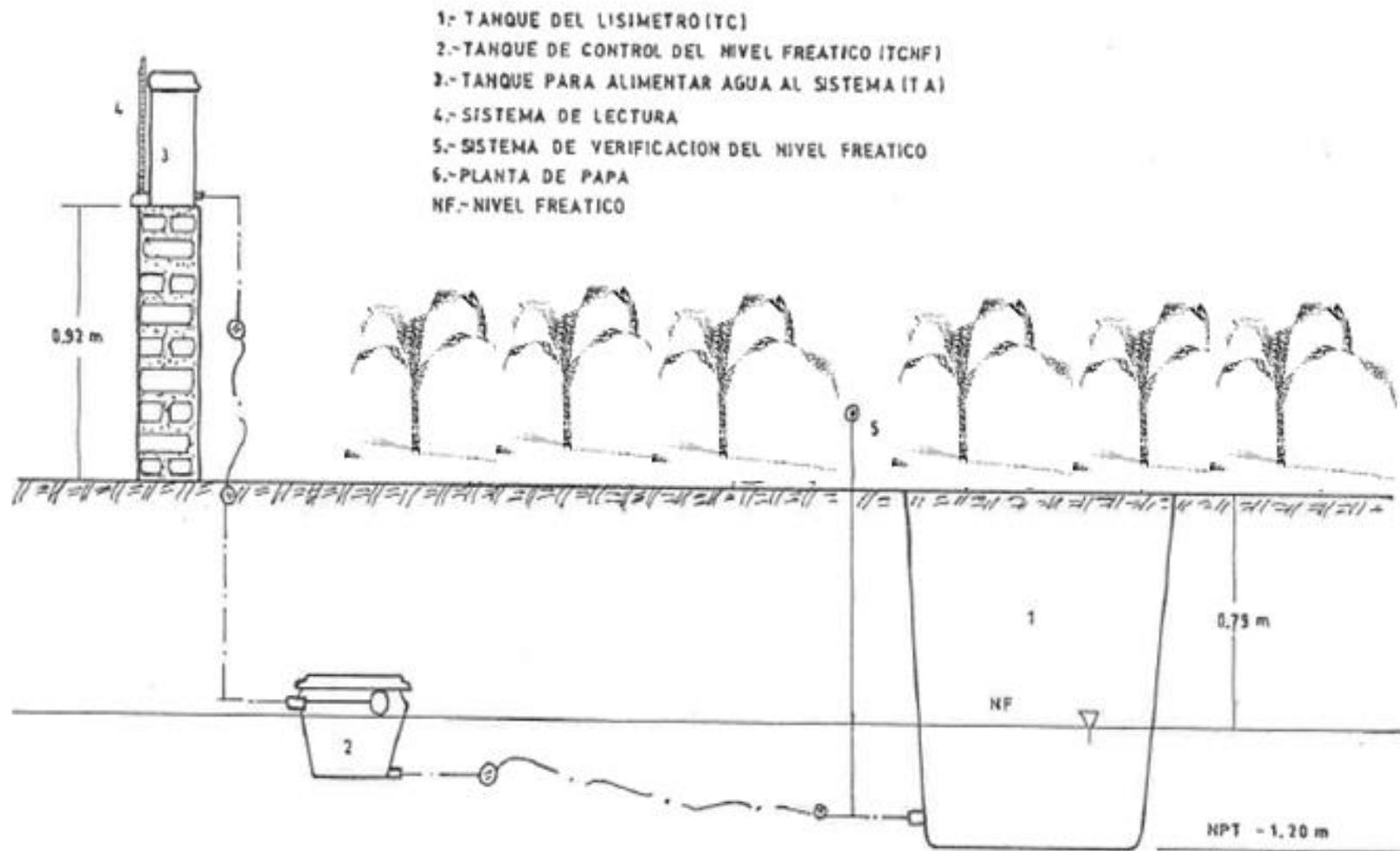


Figura 4: Instalación del lisímetro.

3.4.2. Determinación de los parámetros biométricos de aplicación de riego del cultivo

En esta parte de la tesis se tuvo interés en conocer los siguientes parámetros:

- a. El tiempo necesario para alcanzar las etapas antes mencionadas.
- b. La profundidad media del 80 por ciento del sistema radicular del cultivo en cada una de las etapas.

Para lo cual, fue necesario considerar el siguiente cuadro; en donde se agrupa el ciclo vegetativo del cultivo, en base a su desarrollo y cobertura, en 4 etapas de desarrollo (Doorembos, 1979), tal como se indica en la Tabla 6.

Tabla 6: Etapas de desarrollo del cultivo

Desarrollo y cobertura vegetal	Etapas	Requerimiento hídrico mm
. Emergencia hasta el 10% de Dv	I	19,71
. Del 10% Dv - 80% Dv	II	58,98
. Del 80% Dv - 100% Dv	III	175,87
. Fase de maduración	IV	98,24
Demanda total del cultivo:		352,8

FUENTE: Doorembos (1979)

De acuerdo a este cuadro, se pudo determinar las fechas en que el cultivo alcanzó la finalización de 10 por ciento, 80 por ciento y 100 por ciento de desarrollo vegetativo; así como, la fecha en la que completó su maduración. Todo ello se realizó midiendo la cobertura vegetal. La cual se realizó utilizando una rejilla de madera, en las que las dimensiones del marco fueron de acuerdo a las distancias entre surcos y plantas (1.45m por 0.35m).

Las lecturas se realizaron de acuerdo a Burstall y Harris (1983) y CIP (1986), es decir, mirando de arriba hacia abajo y contando el número de cuadros que cubran más del 50 por ciento del follaje del cultivo. La frecuencia de la lectura fue diaria y, el área de observación estuvo constituida por 160 plantas (100%).

Para determinar las fechas en las que el cultivo alcanza la finalización de 10 por ciento, 80 por ciento y 100 por ciento del desarrollo vegetativo se procede de la siguiente manera:

- a. Para la lectura de cobertura vegetal del cultivo en la parcela con la rejilla de madera, se estableció lo siguiente:
 - Para considerar el 10 por ciento del desarrollo vegetativo, se tenía que presentar 10 cuadrados cubiertos de hojas verdes.
 - Para considerar 80 por ciento del desarrollo vegetativo, se tenía que presentar 80 cuadrados cubiertos de hojas verdes.
 - Para considerar 100 por ciento del desarrollo vegetativo, se tenía que presentar 100 cuadrados cubiertos de hojas verdes.

- b. Para determinar la fecha en la que se alcanza el 10 por ciento de desarrollo vegetativo se considera que el 80 por ciento de plantas alcance esa etapa del desarrollo, de un total de 160 plantas.

- c. Para determinar la fecha en la que se alcanza el 80 por ciento de desarrollo vegetativo se considera que el 80 por ciento de plantas alcance esa etapa de desarrollo, de un total de 160 plantas.

- d. Para determinar la fecha en la que se alcanza el 100 por ciento de desarrollo vegetativo se considera que el 80 por ciento de plantas alcance esa etapa de desarrollo, de un total de 160 plantas.

Para determinar la profundidad media del sistema radicular se realizaron muestreos de la planta a la finalización de las distintas etapas del cultivo I, II, III, IV. Para luego medir profundidad media de raíces, anotando además las fechas en las que se realizaron éstos, con la finalidad de saber la duración de etapas y el tiempo necesario para alcanzar una determinada etapa fenológica.

3.4.3. Determinación del coeficiente de cultivo (Kc) en base al lisímetro

Para el cálculo del Coeficiente de cultivo (Kc) se consideró la siguiente fórmula:

$$ET_c = K_c * ET_r$$

Donde ET_c es la evapotranspiración del cultivo (mm), el K_c es el coeficiente de cultivo (adimensional) y ET_r es la evapotranspiración de referencia (mm).

La estimación de ET_r incorpora los efectos de los diferentes factores meteorológicos para establecer la demanda de agua que realiza la atmósfera. Por esto, el K_c varía con las condiciones particulares del cultivo, viéndose afectado por el clima sólo en una pequeña proporción.

Para el cálculo del coeficiente de cultivo en base al lisímetro se usó la evapotranspiración real del lisímetro y como datos de evapotranspiración potencial los obtenidos mediante los métodos Penman Monteith y Penman Modificado.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Determinación de la demanda hídrica del cultivo

4.1.1. Calibración del lisímetro

Para la calibración del lisímetro fue necesario contar con humedad del suelo en base a peso en su capacidad de campo para las capas de 15, 25 y 35 cm. Obteniéndose los siguientes resultados (Tabla 7).

Tabla 7: Humedad del suelo (%) en capacidad de campo en parcela experimental

Capa (cm)	U _A (%)	U _B (%)	U _C (%)
15	24,87	24,86	24,87
25	25,55	25,53	25,56
35	26,21	26	26,1

4.1.2. Requerimiento hídrico

Aplicando la ecuación para hallar la demanda hídrica con el método de lisímetro,

$$E_m = 1.1766 * (h)$$

Se obtuvo lo siguiente:

a. Demanda hídrica hasta el 10 % de desarrollo vegetativo

El requerimiento hídrico del cultivo en esta etapa (21 días) varió entre 0.59 y 1.4 mm/día tal como se muestra en la Tabla 8 y Figura 5. La demanda hídrica total del cultivo en este período fue 19.1 mm, esto se debió a que el cultivo de maíz se encontró en su crecimiento inicial.

b. Demanda hídrica en la etapa del 10 % al 80 % de desarrollo vegetativo

El requerimiento hídrico del cultivo en esta etapa (37 días) varió entre 0.47 y 3.72 mm/día tal como se muestra en el Tabla 8 y Figura 5. La demanda hídrica total del cultivo en este período fue 58.98 mm.

c. Demanda hídrica en la etapa del 80 % al 100 % de desarrollo vegetativo

En esta etapa (62 días) hubo máximo consumo de agua, el cual osciló entre 0.64 y 4.99 mm/día, tal como se muestra en el Tabla 9 y Figura 5. La demanda hídrica total del cultivo en esta etapa fue 175.87 mm, debido a que el cultivo se encontró en su estado de desarrollo y crecimiento intenso.

d. Demanda hídrica en la etapa de maduración

El requerimiento hídrico del cultivo en la esta etapa (42 días) varió entre 0.21 y 4.67 mm/día, tal como se muestra en el Tabla 10 y en la Figura 5. El consumo total de agua en esta etapa fue de 98.2 mm debido a que el cultivo se encontró en su última etapa.

Tabla 8: Demanda hídrica durante el período de emergencia hasta el 10 % de desarrollo vegetativo y en la etapa del 10 % al 80 % del desarrollo vegetativo

Etapa	Fecha de lectura del lisímetro		Em	
			mm/día	Total (mm)
I	01/09/2015	1	1,17	19,07
	02/09/2015	2	1,17	
	03/09/2015	3	1,40	
	04/09/2015	4	1,17	
	05/09/2015	5	0,94	
	06/09/2015	6	0,94	
	07/09/2015	7	0,94	
	08/09/2015	8	0,82	
	09/09/2015	9	0,82	
	10/09/2015	10	0,94	
	11/09/2015	11	0,82	
	12/09/2015	12	0,70	
	13/09/2015	13	0,82	
	14/09/2015	14	0,82	
	15/09/2015	15	1,05	
	16/09/2015	16	0,82	
	17/09/2015	17	0,82	
	18/09/2015	18	0,70	
	19/09/2015	19	0,59	
	20/09/2015	20	0,82	
	21/09/2015	21	0,82	
II	22/09/2015	22	0,47	58,98
	23/09/2015	23	0,94	
	24/09/2015	24	1,05	
	25/09/2015	25	0,70	
	26/09/2015	26	0,82	
	27/09/2015	27	0,70	
	28/09/2015	28	0,59	
	29/09/2015	29	0,82	
	30/09/2015	30	0,70	
	01/10/2015	31	0,94	
	02/10/2015	32	0,82	
	03/10/2015	33	1,17	
	04/10/2015	34	1,17	
	05/10/2015	35	1,17	
	06/10/2015	36	1,05	
	07/10/2015	37	1,06	
	08/10/2015	38	1,27	
	09/10/2015	39	1,27	
	10/10/2015	40	1,38	
	11/10/2015	41	1,70	
	12/10/2015	42	1,59	
	13/10/2015	43	1,70	
	14/10/2015	44	2,02	
	15/10/2015	45	2,02	
	16/10/2015	46	2,34	
	17/10/2015	47	2,12	
	18/10/2015	48	2,76	
	19/10/2015	49	3,08	
	20/10/2015	50	3,08	
	21/10/2015	51	2,12	
	22/10/2015	52	2,12	
	23/10/2015	53	2,34	
	24/10/2015	54	1,81	
	25/10/2015	55	1,81	
	26/10/2015	56	1,81	
	27/10/2015	57	2,76	
	28/10/2015	58	3,72	

Tabla 9: Demanda hídrica durante el período del 80 % al 100 % de desarrollo vegetativo

Etapa	Fecha de lectura del lisímetro	Em	
		mm/día	Total (mm)
	29/10/2015	59	3,50
	30/10/2015	60	2,66
	31/10/2015	61	1,91
	01/11/2015	62	1,70
	02/11/2015	63	1,91
	03/11/2015	64	1,81
	04/11/2015	65	3,40
	05/11/2015	66	3,50
	06/11/2015	67	2,44
	07/11/2015	68	3,61
	08/11/2015	69	2,44
	09/11/2015	70	2,55
	10/11/2015	71	4,99
	11/11/2015	72	3,82
	12/11/2015	73	4,14
	13/11/2015	74	3,72
	14/11/2015	75	2,66
	15/11/2015	76	2,66
	16/11/2015	77	2,97
	17/11/2015	78	3,29
	18/11/2015	79	4,46
	19/11/2015	80	0,74
	20/11/2015	81	3,40
	21/11/2015	82	4,04
	22/11/2015	83	4,46
	23/11/2015	84	1,06
	24/11/2015	85	2,97
	25/11/2015	86	2,87
	26/11/2015	87	1,59
	27/11/2015	88	0,96
III	28/11/2015	89	0,64
	29/11/2015	90	0,74
	30/11/2015	91	2,55
	01/12/2015	92	2,34
	02/12/2015	93	2,34
	03/12/2015	94	2,23
	04/12/2015	95	2,97
	05/12/2015	96	2,76
	06/12/2015	97	2,66
	07/12/2015	98	2,87
	08/12/2015	99	3,29
	09/12/2015	100	2,76
	10/12/2015	101	2,76
	11/12/2015	102	2,97
	12/12/2015	103	2,44
	13/12/2015	104	2,23
	14/12/2015	105	3,08
	15/12/2015	106	2,97
	16/12/2015	107	3,40
	17/12/2015	108	3,29
	18/12/2015	109	2,87
	19/12/2015	110	2,34
	20/12/2015	111	3,40
	21/12/2015	112	3,29
	22/12/2015	113	2,76
	23/12/2015	114	2,87
	24/12/2015	115	3,08
	25/12/2015	116	3,61
	26/12/2015	117	3,08
	27/12/2015	118	3,40
	28/12/2015	119	3,82
	29/12/2015	120	3,82
			175,87

Tabla 10: Demanda hídrica durante el período de maduración

Etapa	Fecha de lectura del lisímetro		Em	
			mm/día	Total (mm)
	30/12/2015	121	3,40	
	31/12/2015	122	2,87	
	01/01/2016	123	3,93	
	02/01/2016	124	4,14	
	03/01/2016	125	4,67	
	04/01/2016	126	4,46	
	05/01/2016	127	3,93	
	06/01/2016	128	3,08	
	07/01/2016	129	3,08	
	08/01/2016	130	2,12	
	09/01/2016	131	2,55	
	10/01/2016	132	2,44	
	11/01/2016	133	2,23	
	12/01/2016	134	2,34	
	13/01/2016	135	2,76	
	14/01/2016	136	3,50	
	15/01/2016	137	2,44	
	16/01/2016	138	2,12	
	17/01/2016	139	2,02	
	18/01/2016	140	3,40	
IV	19/01/2016	141	3,08	98,24
	20/01/2016	142	2,87	
	21/01/2016	143	2,12	
	22/01/2016	144	2,23	
	23/01/2016	145	1,81	
	24/01/2016	146	2,34	
	25/01/2016	147	1,91	
	26/01/2016	148	2,12	
	27/01/2016	149	1,91	
	28/01/2016	150	1,91	
	29/01/2016	151	2,66	
	30/01/2016	152	1,06	
	31/01/2016	153	1,06	
	01/02/2016	154	1,59	
	02/02/2016	155	1,49	
	03/02/2016	156	0,85	
	04/02/2016	157	0,53	
	05/02/2016	158	1,06	
	06/02/2016	159	1,27	
	07/02/2016	160	1,38	
	08/02/2016	161	1,27	
	09/02/2016	162	0,21	

e. **Demanda hídrica por etapas y en el periodo vegetativo total**

El requerimiento hídrico del cultivo en este período se indica en la Tabla 11, donde la evapotranspiración máxima para todo el ciclo vegetativo del cultivo fue 352.8 mm.

Tabla 11: Demanda hídrica total por etapas en el período vegetativo total

Desarrollo y cobertura vegetal	Etapas	Requerimiento hídrico mm
. Emergencia hasta el 10% de Dv	I	19,71
. Del 10% Dv - 80% Dv	II	58,98
. Del 80% Dv - 100% Dv	III	175,87
. Fase de maduración	IV	98,24
Demanda total del cultivo:		352,8

De esto se puede discutir lo siguiente:

- Los valores más altos de la demanda hídrica en cada una de las etapas son ocasionados por la alta temperatura del aire, alta radiación incidente y baja humedad relativa.
- Los valores más bajos de la demanda hídrica en cada una de las etapas son ocasionados por la presencia de nubosidad, bajas temperaturas del aire y alta humedad relativa.
- La necesidad de agua del cultivo de maíz tuvo un comportamiento de crecimiento desde la emergencia hasta los 125 días después de la siembra, luego el consumo de agua decreció en forma lineal hasta la cosecha tal como se observa en la Figura 5.

Demanda hídrica del cultivo de maíz, Método Lisímetro

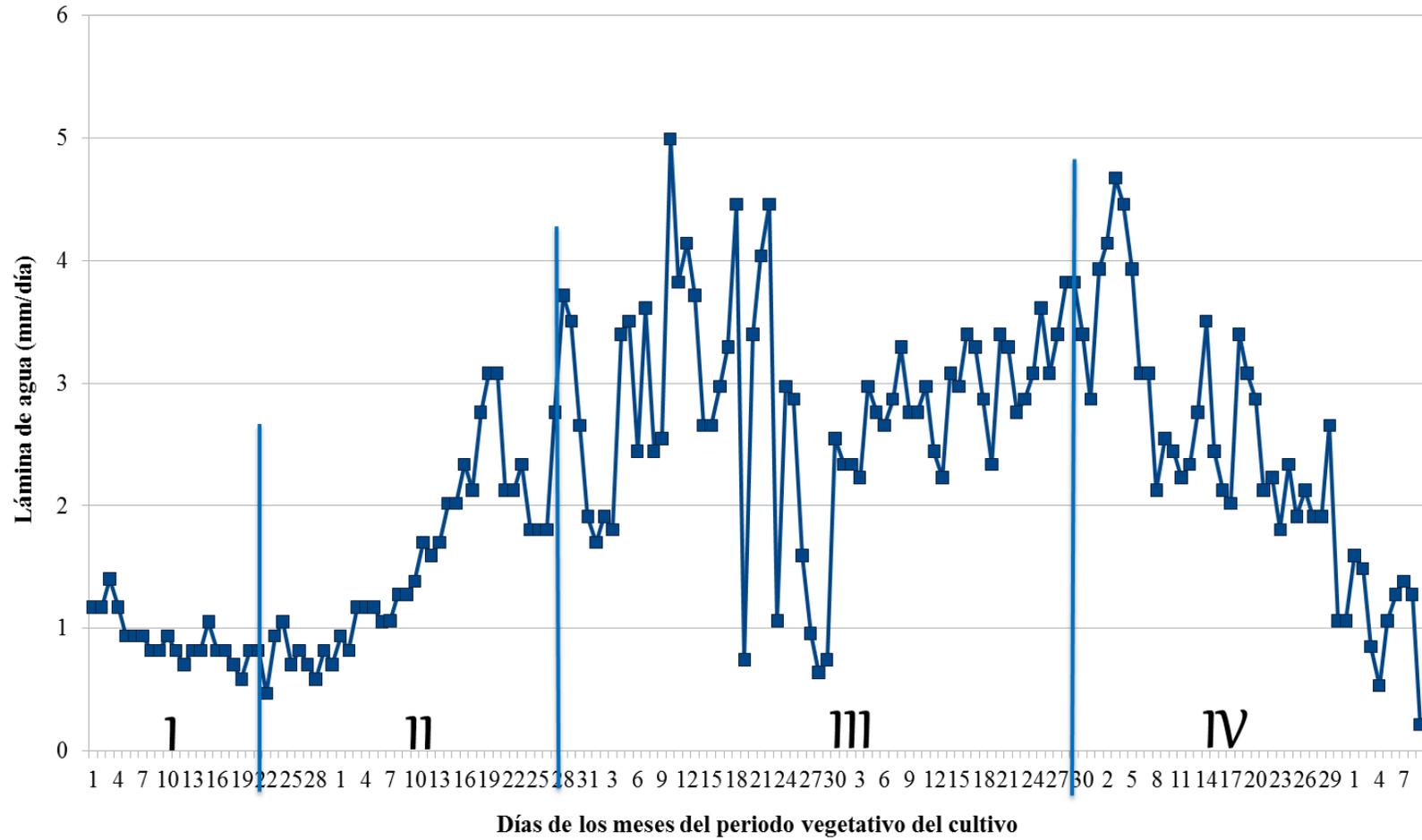


Figura 5: Demanda hídrica del maíz – Método Lisímetro

Tabla 12: Estimación de la demanda hídrica con Penman Monteith

Fecha de lectura del lisímetro	Penman Monteith	
	Eo (mm/día)	Em (mm/día)
01/09/2015	3,2	0,9
02/09/2015	3,7	1,0
03/09/2015	2,8	0,7
04/09/2015	3,4	0,9
05/09/2015	3,3	0,9
06/09/2015	3,4	0,9
07/09/2015	2,8	0,7
08/09/2015	2,4	0,6
09/09/2015	3,1	0,8
10/09/2015	3,2	0,9
11/09/2015	2,5	0,8
12/09/2015	3,8	1,4
13/09/2015	3,6	1,4
14/09/2015	3,0	1,3
15/09/2015	2,5	1,1
16/09/2015	2,3	1,1
17/09/2015	3,4	1,8
18/09/2015	3,7	2,1
19/09/2015	3,4	2,0
20/09/2015	2,9	1,8
21/09/2015	3,2	2,0
22/09/2015	3,3	2,1
23/09/2015	2,5	1,6
24/09/2015	2,1	1,4
25/09/2015	2,4	1,6
26/09/2015	2,8	1,9
27/09/2015	2,2	1,5
28/09/2015	2,5	1,7
29/09/2015	3,2	2,3
30/09/2015	3,4	2,4

«continuación»

01/10/2015	4,2	3,0
02/10/2015	4,1	3,0
03/10/2015	3,9	2,9
04/10/2015	3,9	2,9
05/10/2015	2,3	1,8
06/10/2015	2,4	1,8
07/10/2015	2,4	1,9
08/10/2015	3,9	3,1
09/10/2015	3,5	2,8
10/10/2015	3,8	3,1
11/10/2015	3,6	3,0
12/10/2015	3,4	2,8
13/10/2015	3,5	2,9
14/10/2015	3,6	3,0
15/10/2015	3,6	3,1
16/10/2015	4,0	3,5
17/10/2015	3,1	2,7
18/10/2015	3,8	3,4
19/10/2015	4,2	3,8
20/10/2015	3,9	3,5
21/10/2015	2,7	2,5
22/10/2015	2,9	2,7
23/10/2015	3,7	3,4
24/10/2015	2,7	2,6
25/10/2015	2,3	2,2
26/10/2015	2,9	2,8
27/10/2015	4,2	4,1
28/10/2015	4,2	4,2
29/10/2015	3,9	3,9
30/10/2015	2,9	2,9
31/10/2015	2,4	2,4
01/11/2015	2,2	2,3
02/11/2015	2,4	2,5
03/11/2015	2,8	3,0
04/11/2015	3,8	4,0
05/11/2015	3,6	3,9
06/11/2015	3,5	3,8
07/11/2015	3,5	3,8
08/11/2015	2,8	3,1
09/11/2015	3,4	3,7
10/11/2015	4,4	4,9

«ontinuación»

11/11/2015	3,7	4,1
12/11/2015	3,6	4,1
13/11/2015	3,4	3,9
14/11/2015	2,7	3,2
15/11/2015	3,4	4,0
16/11/2015	3,4	3,9
17/11/2015	3,5	4,2
18/11/2015	3,5	4,2
19/11/2015	3,2	3,8
20/11/2015	3,7	4,5
21/11/2015	3,8	4,6
22/11/2015	2,7	3,3
23/11/2015	3,8	4,7
24/11/2015	3,6	4,5
25/11/2015	4,4	5,5
26/11/2015	3,6	4,6
27/11/2015	2,3	2,9
28/11/2015	3,5	4,4
29/11/2015	4,0	5,0
30/11/2015	3,6	4,5
01/12/2015	3,5	4,3
02/12/2015	3,6	4,3
03/12/2015	4,0	4,8
04/12/2015	4,2	5,0
05/12/2015	3,9	4,6
06/12/2015	4,2	4,8
07/12/2015	2,6	3,0
08/12/2015	3,4	3,9
09/12/2015	5,2	5,9
10/12/2015	4,7	5,3
11/12/2015	3,8	4,2
12/12/2015	3,9	4,2
13/12/2015	2,6	2,8
14/12/2015	2,8	3,0
15/12/2015	4,4	4,6
16/12/2015	5,1	5,2
17/12/2015	3,6	3,7
18/12/2015	2,3	2,4
19/12/2015	3,3	3,2
20/12/2015	3,3	3,2

«continuación»

21/12/2015	2,9	2,8
22/12/2015	3,8	3,6
23/12/2015	2,9	2,7
24/12/2015	3,4	3,2
25/12/2015	3,9	3,6
26/12/2015	4,0	3,6
27/12/2015	3,0	2,7
28/12/2015	4,2	3,7
29/12/2015	4,6	3,9
30/12/2015	3,8	3,2
31/12/2015	3,7	3,1
01/01/2016	4,1	3,4
02/01/2016	5,0	4,0
03/01/2016	5,0	4,0
04/01/2016	4,6	3,6
05/01/2016	4,7	3,6
06/01/2016	4,7	3,5
07/01/2016	3,0	2,2
08/01/2016	3,7	2,7
09/01/2016	4,0	2,9
10/01/2016	4,5	3,2
11/01/2016	4,1	2,8
12/01/2016	4,4	3,0
13/01/2016	3,9	2,6
14/01/2016	3,3	2,1
15/01/2016	3,8	2,4
16/01/2016	4,7	2,9
17/01/2016	4,8	2,9
18/01/2016	4,9	2,9
19/01/2016	4,3	2,5
20/01/2016	4,6	2,6
21/01/2016	3,9	2,1
22/01/2016	4,9	2,6
23/01/2016	4,1	2,2
24/01/2016	3,1	1,6
25/01/2016	4,4	2,2
26/01/2016	4,7	2,3
27/01/2016	4,7	2,2
28/01/2016	4,2	1,9

«continuación»

29/01/2016	4,6	2,0
30/01/2016	4,4	1,9
31/01/2016	4,6	1,9
01/02/2016	4,2	1,7
02/02/2016	4,3	1,7
03/02/2016	4,4	1,6
04/02/2016	4,6	1,7
05/02/2016	5,2	1,8
06/02/2016	4,9	1,6
07/02/2016	5,1	1,6
08/02/2016	3,4	1,0
09/02/2016	4,4	1,3

Tabla 13: Estimación de la demanda hídrica con Penman Modificado

Fecha de lectura del lisímetro	Penman Modificado	
	Eo (mm/día)	Em (mm/día)
01/09/2015	3,0	0,8
02/09/2015	4,3	1,1
03/09/2015	2,4	0,6
04/09/2015	3,4	0,9
05/09/2015	3,3	0,9
06/09/2015	3,5	0,9
07/09/2015	2,4	0,6
08/09/2015	1,9	0,5
09/09/2015	3,0	0,8
10/09/2015	3,2	0,9
11/09/2015	2,1	0,7
12/09/2015	4,4	1,6
13/09/2015	4,0	1,6
14/09/2015	2,8	1,2
15/09/2015	1,9	0,9
16/09/2015	1,7	0,8
17/09/2015	3,5	1,8
18/09/2015	4,2	2,3
19/09/2015	3,3	1,9

«continuación»

20/09/2015	2,5	1,5
21/09/2015	3,0	1,9
22/09/2015	3,1	2,0
23/09/2015	2,0	1,3
24/09/2015	1,5	1,0
25/09/2015	1,8	1,2
26/09/2015	2,4	1,6
27/09/2015	1,6	1,1
28/09/2015	2,0	1,4
29/09/2015	3,1	2,2
30/09/2015	3,2	2,3
01/10/2015	4,7	3,4
02/10/2015	4,5	3,3
03/10/2015	4,2	3,1
04/10/2015	3,9	3,0
05/10/2015	1,7	1,3
06/10/2015	1,7	1,3
07/10/2015	1,7	1,3
08/10/2015	4,0	3,2
09/10/2015	3,3	2,6
10/10/2015	3,7	3,0
11/10/2015	3,6	3,0
12/10/2015	3,3	2,7
13/10/2015	3,3	2,7
14/10/2015	3,4	2,9
15/10/2015	1,8	1,5
16/10/2015	4,1	3,6
17/10/2015	2,7	2,4
18/10/2015	3,8	3,4
19/10/2015	4,3	3,8
20/10/2015	3,8	3,5
21/10/2015	2,2	2,0
22/10/2015	2,4	2,2
23/10/2015	3,6	3,4
24/10/2015	2,1	2,0
25/10/2015	1,6	1,5

«continuación»

26/10/2015	2,3	2,2
27/10/2015	4,3	4,2
28/10/2015	4,7	4,7
29/10/2015	3,9	3,9
30/10/2015	2,4	2,4
31/10/2015	1,7	1,7
01/11/2015	1,5	1,5
02/11/2015	1,8	1,9
03/11/2015	2,2	2,3
04/11/2015	3,8	4,0
05/11/2015	3,8	4,1
06/11/2015	3,4	3,7
07/11/2015	3,3	3,5
08/11/2015	2,4	2,6
09/11/2015	3,0	3,3
10/11/2015	4,6	5,1
11/11/2015	3,5	3,9
12/11/2015	3,4	3,9
13/11/2015	3,2	3,6
14/11/2015	2,2	2,5
15/11/2015	3,2	3,7
16/11/2015	3,1	3,6
17/11/2015	3,4	4,0
18/11/2015	3,4	4,1
19/11/2015	2,8	3,4
20/11/2015	3,5	4,2
21/11/2015	3,7	4,5
22/11/2015	2,1	2,5
23/11/2015	3,7	4,6
24/11/2015	3,4	4,2
25/11/2015	4,6	5,9
26/11/2015	3,4	4,4
27/11/2015	1,5	1,9
28/11/2015	3,2	4,0
29/11/2015	3,9	4,9
30/11/2015	3,4	4,2

«continuación»

01/12/2015	3,3	4,1
02/12/2015	3,2	3,9
03/12/2015	4,2	5,1
04/12/2015	4,5	5,4
05/12/2015	4,0	4,7
06/12/2015	4,5	5,3
07/12/2015	1,9	2,2
08/12/2015	3,2	3,6
09/12/2015	6,6	7,5
10/12/2015	5,7	6,3
11/12/2015	3,5	3,8
12/12/2015	3,7	4,1
13/12/2015	1,8	2,0
14/12/2015	2,2	2,4
15/12/2015	5,1	5,3
16/12/2015	5,7	5,9
17/12/2015	3,3	3,4
18/12/2015	1,5	1,5
19/12/2015	2,7	2,7
20/12/2015	2,7	2,6
21/12/2015	2,2	2,2
22/12/2015	3,5	3,3
23/12/2015	2,1	2,0
24/12/2015	3,0	2,8
25/12/2015	3,7	3,4
26/12/2015	3,8	3,4
27/12/2015	2,3	2,0
28/12/2015	4,3	3,8
29/12/2015	4,8	4,1
30/12/2015	3,5	3,0
31/12/2015	3,4	2,8
01/01/2016	4,2	3,4
02/01/2016	5,9	4,8
03/01/2016	5,5	4,4
04/01/2016	4,6	3,6
05/01/2016	4,4	3,4
06/01/2016	4,8	3,7
07/01/2016	2,2	1,6

«continuación»

08/01/2016	3,2	2,3
09/01/2016	3,7	2,7
10/01/2016	4,7	3,3
11/01/2016	3,7	2,5
12/01/2016	4,1	2,8
13/01/2016	3,6	2,4
14/01/2016	2,6	1,7
15/01/2016	3,2	2,0
16/01/2016	5,1	3,1
17/01/2016	5,1	3,1
18/01/2016	5,0	3,0
19/01/2016	4,1	2,4
20/01/2016	4,8	2,7
21/01/2016	3,2	1,8
22/01/2016	4,8	2,6
23/01/2016	3,7	1,9
24/01/2016	2,3	1,2
25/01/2016	4,4	2,2
26/01/2016	4,3	2,1
27/01/2016	4,8	2,3
28/01/2016	3,8	1,7
29/01/2016	4,3	1,9
30/01/2016	3,9	1,7
31/01/2016	4,1	1,7
01/02/2016	4,0	1,6
02/02/2016	3,9	1,5
03/02/2016	3,7	1,4
04/02/2016	4,3	1,6
05/02/2016	5,5	1,9
06/02/2016	4,8	1,6
07/02/2016	5,1	1,7
08/02/2016	2,7	0,8
09/02/2016	4,2	1,2

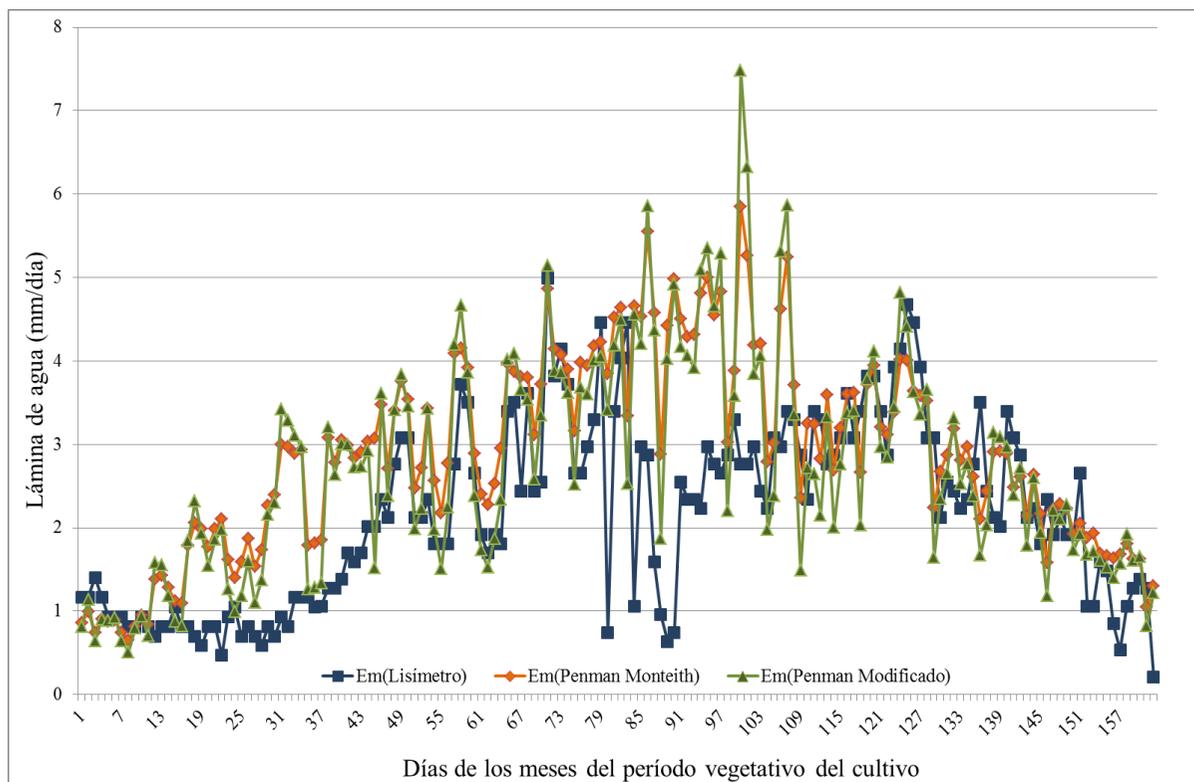


Figura 6: Demanda hídrica del maíz – Métodos: Lisímetro, Penman Monteith y Modificado.

En la Figura 6, la tendencia de los métodos Penman Monteith y Modificado es muy similar; sin embargo, la diferencia que hay de dato a dato, entre los métodos arriba mencionados y el método lisímetro, es amplia sobre todo en las etapas II y III. Tener en cuenta que los valores de los métodos Penman Monteith y Modificado son estimados (no consideran los aspectos del cultivo); mientras que, los de lisímetro son reales. Sería necesario realizar otro experimento para verificar esas diferencias.

4.2. Determinación de los parámetros biométricos de aplicación de riego del cultivo

Los parámetros biométricos del cultivo son apreciados a través de los aspectos:

4.2.1. Determinación de las fechas en las que el cultivo alcanzó la finalización de las distintas etapas y duración de ellas

a. Determinación de la fecha en la que alcanzó la finalización del 10% de desarrollo vegetativo

Este porcentaje de desarrollo vegetativo se dio el 21 de setiembre del 2015 (a los 21 días después de la siembra).

b. Determinación de la fecha en la que alcanzó la finalización del 80% de desarrollo vegetativo

Este porcentaje de desarrollo vegetativo fue el 28 de octubre del 2015 (a los 58 días después de la siembra).

c. Determinación de la fecha en la que alcanzó la finalización del 100% de desarrollo vegetativo

Este porcentaje de desarrollo vegetativo se dio el 29 de diciembre del 2015 (a los 120 días después de la siembra).

d. Duración de las etapas de desarrollo del cultivo

En la Tabla 14 se indica la duración de las etapas fenológicas. Ello se consiguió teniendo en cuenta el inicio y el fin de las distintas etapas.

Tabla 14: Inicio, fin y duración de las etapas del desarrollo vegetativo

Desarrollo y cobertura del cultivo	Etapas	Inicio	Fin	Duración de las etapas (días)
. Siembra - inicio de emergencia		01/09/2015	09/09/2015	9
. Emergencia - 10% de desarrollo vegetativo (Dv)	I	10/09/2015	21/09/2015	12
. Del 10% Dv - 80% Dv	II	22/09/2015	28/10/2015	37
. Del 80% Dv - 100% Dv	III	29/10/2015	29/12/2015	62
. Etapa de maduración	IV	30/12/2015	09/01/2016	42

4.2.2. Determinación de la profundidad de raíz en cada etapa

Tabla 15: Profundidad de raíz en cada etapa

Parámetros biométricos	Etapas				
	Siembra al inicio de emergencia	I	II	III	IV
. Duración de la etapa fenológica (días)	9	12	37	62	42
. Profundidad de raíces al finalizar las etapas (cm)	-	13,7	27,8	41,2	41,2
Días después de la siembra	9	21	58	120	162

4.3. Determinación del coeficiente de cultivo (Kc) en base al lisímetro

a. Resultados del Kc para el método Penman Modificado

Etapa	Fecha	Días de siembra	Kc Penman Modificado	
			Kc	Kc promedio
I	01/09/2015	1	0,3840	0,32
	02/09/2015	2	0,2733	
	03/09/2015	3	0,5860	
	04/09/2015	4	0,3433	
	05/09/2015	5	0,2813	
	06/09/2015	6	0,2706	
	07/09/2015	7	0,3868	
	08/09/2015	8	0,4281	
	09/09/2015	9	0,2743	
	10/09/2015	10	0,2960	
	11/09/2015	11	0,3832	
	12/09/2015	12	0,1601	
	13/09/2015	13	0,2067	
	14/09/2015	14	0,2949	
	15/09/2015	15	0,5493	
	16/09/2015	16	0,4832	
	17/09/2015	17	0,2316	
	18/09/2015	18	0,1671	
	19/09/2015	19	0,1769	
	20/09/2015	20	0,3253	
	21/09/2015	21	0,2755	

«continuación»

Etapa	Fexha	Días de siembra	Kc Penman Modificado	
			Kc	Kc promedio
	22/09/2015	22	0,1503	
	23/09/2015	23	0,4773	
	24/09/2015	24	0,6914	
	25/09/2015	25	0,3926	
	26/09/2015	26	0,3447	
	27/09/2015	27	0,4355	
	28/09/2015	28	0,2964	
	29/09/2015	29	0,2672	
	30/09/2015	30	0,2178	
	01/10/2015	31	0,1979	
	02/10/2015	32	0,1827	
	03/10/2015	33	0,2800	
	04/10/2015	34	0,2967	
	05/10/2015	35	0,7044	
	06/10/2015	36	0,6343	
	07/10/2015	37	0,6207	
	08/10/2015	38	0,3148	
	09/10/2015	39	0,3878	
II	10/10/2015	40	0,3732	0,56
	11/10/2015	41	0,4663	
	12/10/2015	42	0,4855	
	13/10/2015	43	0,5228	
	14/10/2015	44	0,5871	
	15/10/2015	45	1,1439	
	16/10/2015	46	0,5643	
	17/10/2015	47	0,7861	
	18/10/2015	48	0,7217	
	19/10/2015	49	0,7230	
	20/10/2015	50	0,8122	
	21/10/2015	51	0,9861	
	22/10/2015	52	0,8843	
	23/10/2015	53	0,6412	
	24/10/2015	54	0,8659	
	25/10/2015	55	1,1499	
	26/10/2015	56	0,7792	
	27/10/2015	57	0,6451	
	28/10/2015	58	0,7887	

«continuación»

Etapa	Fecha	Dias de siembra	Kc Penman Modificado	
			Kc	Kc promedio
	29/10/2015	59	0,9072	
	30/10/2015	60	1,1250	
	31/10/2015	61	1,1199	
	01/11/2015	62	1,1442	
	02/11/2015	63	1,0591	
	03/11/2015	64	0,8078	
	04/11/2015	65	0,8938	
	05/11/2015	66	0,9150	
	06/11/2015	67	0,7201	
	07/11/2015	68	1,1086	
	08/11/2015	69	1,0359	
	09/11/2015	70	0,8415	
	10/11/2015	71	1,0830	
	11/11/2015	72	1,1072	
	12/11/2015	73	1,2167	
	13/11/2015	74	1,1744	
	14/11/2015	75	1,2173	
	15/11/2015	76	0,8389	
	16/11/2015	77	0,9683	
	17/11/2015	78	0,9714	
	18/11/2015	79	1,3134	
	19/11/2015	80	0,2622	
	20/11/2015	81	0,9828	
	21/11/2015	82	1,0975	
	22/11/2015	83	2,1726	
	23/11/2015	84	0,2889	
	24/11/2015	85	0,8842	
	25/11/2015	86	0,6170	
	26/11/2015	87	0,4635	
	27/11/2015	88	0,6547	
III	28/11/2015	89	0,2006	0,93
	29/11/2015	90	0,1895	
	30/11/2015	91	0,7586	
	01/12/2015	92	0,7071	
	02/12/2015	93	0,7254	
	03/12/2015	94	0,5265	
	04/12/2015	95	0,6608	
	05/12/2015	96	0,6976	
	06/12/2015	97	0,5845	
	07/12/2015	98	1,4973	
	08/12/2015	99	1,0451	
	09/12/2015	100	0,4154	
	10/12/2015	101	0,4852	
	11/12/2015	102	0,8496	
	12/12/2015	103	0,6529	
	13/12/2015	104	1,2121	
	14/12/2015	105	1,3718	
	15/12/2015	106	0,5859	
	16/12/2015	107	0,5994	
	17/12/2015	108	1,0004	
	18/12/2015	109	1,9453	
	19/12/2015	110	0,8574	
	20/12/2015	111	1,2624	
	21/12/2015	112	1,4856	
	22/12/2015	113	0,7934	
	23/12/2015	114	1,3487	
	24/12/2015	115	1,0377	
	25/12/2015	116	0,9833	
	26/12/2015	117	0,8187	
	27/12/2015	118	1,4958	
	28/12/2015	119	0,8889	
	29/12/2015	120	0,8044	

«continuación»

Etapa	Fecha	Dias de siembra	Kc Penman Modificado	
			Kc	Kc promedio
	30/12/2015	121	0,9746	
	31/12/2015	122	0,8458	
	01/01/2016	123	0,9416	
	02/01/2016	124	0,6982	
	03/01/2016	125	0,8451	
	04/01/2016	126	0,9655	
	05/01/2016	127	0,9010	
	06/01/2016	128	0,6380	
	07/01/2016	129	1,3948	
	08/01/2016	130	0,6609	
	09/01/2016	131	0,6889	
	10/01/2016	132	0,5177	
	11/01/2016	133	0,6070	
	12/01/2016	134	0,5710	
	13/01/2016	135	0,7679	
	14/01/2016	136	1,3589	
	15/01/2016	137	0,7619	
	16/01/2016	138	0,4197	
	17/01/2016	139	0,3971	
	18/01/2016	140	0,6802	
IV	19/01/2016	141	0,7457	0,59
	20/01/2016	142	0,5981	
	21/01/2016	143	0,6576	
	22/01/2016	144	0,4626	
	23/01/2016	145	0,4883	
	24/01/2016	146	1,0092	
	25/01/2016	147	0,4312	
	26/01/2016	148	0,4904	
	27/01/2016	149	0,3961	
	28/01/2016	150	0,5035	
	29/01/2016	151	0,6118	
	30/01/2016	152	0,2720	
	31/01/2016	153	0,2585	
	01/02/2016	154	0,4003	
	02/02/2016	155	0,3802	
	03/02/2016	156	0,2275	
	04/02/2016	157	0,1222	
	05/02/2016	158	0,1924	
	06/02/2016	159	0,2652	
	07/02/2016	160	0,2689	
	08/02/2016	161	0,4777	
	09/02/2016	162	0,0512	

b. Resultados del Kc para el método Penman Monteith

Etapa	Fecha	Dias de siembra	Kc Penman Monteith	
			Kc	Kc promedio
I	01/09/2015	1	0,3611	0,30
	02/09/2015	2	0,3137	
	03/09/2015	3	0,5014	
	04/09/2015	4	0,3441	
	05/09/2015	5	0,2845	
	06/09/2015	6	0,2786	
	07/09/2015	7	0,3367	
	08/09/2015	8	0,3370	
	09/09/2015	9	0,2668	
	10/09/2015	10	0,2953	
	11/09/2015	11	0,3224	
	12/09/2015	12	0,1833	
	13/09/2015	13	0,2250	
	14/09/2015	14	0,2712	
	15/09/2015	15	0,4280	
	16/09/2015	16	0,3640	
	17/09/2015	17	0,2381	
	18/09/2015	18	0,1877	
	19/09/2015	19	0,1721	
	20/09/2015	20	0,2844	
	21/09/2015	21	0,2575	

«continuación»

Etapas	Fecha	Días de siembra	Kc Penman Monteith	
			Kc	Kc promedio
	22/09/2015	22	0,1410	
	23/09/2015	23	0,3729	
	24/09/2015	24	0,4921	
	25/09/2015	25	0,2937	
	26/09/2015	26	0,2946	
	27/09/2015	27	0,3134	
	28/09/2015	28	0,2340	
	29/09/2015	29	0,2543	
	30/09/2015	30	0,2096	
	01/10/2015	31	0,2255	
	02/10/2015	32	0,2022	
	03/10/2015	33	0,3008	
	04/10/2015	34	0,3000	
	05/10/2015	35	0,5000	
	06/10/2015	36	0,4481	
	07/10/2015	37	0,4481	
	08/10/2015	38	0,3276	
	09/10/2015	39	0,3673	
II	10/10/2015	40	0,3672	0,49
	11/10/2015	41	0,4668	
	12/10/2015	42	0,4672	
	13/10/2015	43	0,4925	
	14/10/2015	44	0,5668	
	15/10/2015	45	0,5668	
	16/10/2015	46	0,5856	
	17/10/2015	47	0,6919	
	18/10/2015	48	0,7228	
	19/10/2015	49	0,7386	
	20/10/2015	50	0,7917	
	21/10/2015	51	0,7896	
	22/10/2015	52	0,7274	
	23/10/2015	53	0,6401	
	24/10/2015	54	0,6687	
	25/10/2015	55	0,7953	
	26/10/2015	56	0,6313	
	27/10/2015	57	0,6622	
	28/10/2015	58	0,8850	

«continuación»

Etapa	Fecha	Dias de siembra	Kc Penman Monteith	
			Kc	Kc promedio
	29/10/2015	59	0,8940	
	30/10/2015	60	0,9283	
	31/10/2015	61	0,8100	
	01/11/2015	62	0,7689	
	02/11/2015	63	0,7834	
	03/11/2015	64	0,6402	
	04/11/2015	65	0,9038	
	05/11/2015	66	0,9655	
	06/11/2015	67	0,6900	
	07/11/2015	68	1,0317	
	08/11/2015	69	0,8601	
	09/11/2015	70	0,7586	
	10/11/2015	71	1,1448	
	11/11/2015	72	1,0389	
	12/11/2015	73	1,1537	
	13/11/2015	74	1,0900	
	14/11/2015	75	0,9690	
	15/11/2015	76	0,7763	
	16/11/2015	77	0,8850	
	17/11/2015	78	0,9326	
	18/11/2015	79	1,2600	
	19/11/2015	80	0,2323	
	20/11/2015	81	0,9111	
	21/11/2015	82	1,0620	
	22/11/2015	83	1,6459	
	23/11/2015	84	0,2832	
	24/11/2015	85	0,8214	
	25/11/2015	86	0,6517	
	26/11/2015	87	0,4425	
	27/11/2015	88	0,4248	
III	28/11/2015	89	0,1826	0,82
	29/11/2015	90	0,1873	
	30/11/2015	91	0,7021	
	01/12/2015	92	0,6695	
	02/12/2015	93	0,6581	
	03/12/2015	94	0,5576	
	04/12/2015	95	0,7080	
	05/12/2015	96	0,7135	
	06/12/2015	97	0,6398	
	07/12/2015	98	1,0903	
	08/12/2015	99	0,9655	
	09/12/2015	100	0,5310	
	10/12/2015	101	0,5838	
	11/12/2015	102	0,7805	
	12/12/2015	103	0,6312	
	13/12/2015	104	0,8578	
	14/12/2015	105	1,0844	
	15/12/2015	106	0,6743	
	16/12/2015	107	0,6703	
	17/12/2015	108	0,9069	
	18/12/2015	109	1,2254	
	19/12/2015	110	0,7167	
	20/12/2015	111	1,0298	
	21/12/2015	112	1,1313	
	22/12/2015	113	0,7363	
	23/12/2015	114	1,0061	
	24/12/2015	115	0,8979	
	25/12/2015	116	0,9211	
	26/12/2015	117	0,7700	
	27/12/2015	118	1,1404	
	28/12/2015	119	0,9038	
	29/12/2015	120	0,8403	

«continuación»

Etapa	Fecha	Dias de siembra	Kc Penman Monteith	
			Kc	Kc promedio
	30/12/2015	121	0,9038	
	31/12/2015	122	0,7729	
	01/01/2016	123	0,9584	
	02/01/2016	124	0,8367	
	03/01/2016	125	0,9308	
	04/01/2016	126	0,9613	
	05/01/2016	127	0,8450	
	06/01/2016	128	0,6623	
	07/01/2016	129	1,0232	
	08/01/2016	130	0,5803	
	09/01/2016	131	0,6356	
	10/01/2016	132	0,5380	
	11/01/2016	133	0,5466	
	12/01/2016	134	0,5310	
	13/01/2016	135	0,7008	
	14/01/2016	136	1,0783	
	15/01/2016	137	0,6361	
	16/01/2016	138	0,4538	
	17/01/2016	139	0,4204	
	18/01/2016	140	0,6978	
IV	19/01/2016	141	0,7196	0,55
	20/01/2016	142	0,6220	
	21/01/2016	143	0,5488	
	22/01/2016	144	0,4561	
	23/01/2016	145	0,4371	
	24/01/2016	146	0,7586	
	25/01/2016	147	0,4315	
	26/01/2016	148	0,4510	
	27/01/2016	149	0,4033	
	28/01/2016	150	0,4541	
	29/01/2016	151	0,5759	
	30/01/2016	152	0,2436	
	31/01/2016	153	0,2294	
	01/02/2016	154	0,3811	
	02/02/2016	155	0,3490	
	03/02/2016	156	0,1953	
	04/02/2016	157	0,1147	
	05/02/2016	158	0,2054	
	06/02/2016	159	0,2622	
	07/02/2016	160	0,2734	
	08/02/2016	161	0,3748	
	09/02/2016	162	0,0481	

V. CONCLUSIONES

Bajo las condiciones en que se llevó a cabo el experimento y en función a los resultados obtenidos, podemos concluir lo siguiente:

1. La demanda hídrica del cultivo de maíz en todo el ciclo vegetativo fue de 352.8 mm.

Adicionalmente, se tuvo que, con el método Penman Modificado una demanda total de 434.32 mm y, con el método Penman Monteith de 460.28 mm.

2. El tiempo necesario en la que se alcanzó la finalización del 10 por ciento, 80 por ciento y 100 por ciento fueron de 21, 58 y 120 días. Asimismo, la profundidad media del 80 por ciento del sistema radicular del cultivo al finalizar las etapas I, II, III y IV fue 13.7, 27.8, 41.2 y 41.2 cm, respectivamente; cuyo tiempo de duración fue de 21, 37, 62 y 42 días.

VI. RECOMENDACIONES

- Repetir el experimento para validar los resultados obtenidos.
- Repetir el experimento en otro periodo de meses para conocer el requerimiento hídrico del mismo cultivo. Asimismo, con otras condiciones climáticas.
- Realizar trabajos de investigación similar, pero con otros cultivos, con la finalidad de conocer, comparar los resultados y saber con exactitud los requerimientos hídricos de cada uno de ellos.

VII. BIBLIOGRAFÍA

Abookaled, A. y Alfaro, J. (1987). Los Lisímetros. FAO, Pub. N° 39. Roma.

Baigorria, P. (1996). Cuantificación de la Evapotranspiración Potencial y determinación de los coeficientes de cultivo (Kc) de camote (*Ipomea batatas* L.) para las localidades de La Molina y Yurimaguas. (Tesis Pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.

Blackman, V.H. (1919). The compound interest law and plant growth. *Annals of Botany*, 33:353-360.

Castro, A. (2011). Insecticidas más importantes para el control de *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) en el cultivo de maíz (*Zea mays*). (Tesis Pregrado). Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Lambayeque, Perú.

Dilley, M. (1997). Climatic factor affecting anual maize yields in the Valley of Oaxaca, Mexico. *International Journal of Climatology* 17: 1549-1557.

Ecuaquímica. (2017). Maíz híbrido Dekalb 7088. Recuperado de http://www.equaquimica.com/pdf_semillas/DEKALB7088.pdf.

HORTUS. (2017). Maíz Dekalb-7088. Lima, Perú. Recuperado de <http://www.hortus.com.pe/Hortus/productoA.php?nombre=MAIZ%20DK-7088>

Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). (2012). INIA 619 Megahíbrido. Lima, Perú. Recuperado de <http://www.inia.gob.pe/prod-servicios/publicaciones/publicacion/tripticos/item/196-05-2012-inia-619-megahibrido>

- Fischer, K.S. y Palmer, A.F.E. (1984). Tropical maize. In P.R. Goldsworthy y N.M. Fischer, eds. *The physiology of tropical field crops*, p. 213-248. New York, NY-USA: J. Wiley and Sons.
- García, V. (1992). *Agrometeorología – Energía y Agua en la Agricultura*. Ediciones UNALM. Lima – Perú.
- García, V. (1998). *Estudio de requerimientos climáticos de cultivos*. Documento inédito. La Molina – Perú.
- Injante, S. (2013). *Manejo Integrado de Maíz Amarillo Duro*. Guía técnica. La Libertad – Perú.
- Jones, P. & Thornton, P.K. (2003). The potencial impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in “2055”. *Global Environmental Change*. 13: 51-59.
- Kiniry, J. & Bonhomme, R. (1991). Predicting maize phenology. En: T. Hodges (ed). *Predicting crop phenology*. CRC Press. Boca Raton, Ann Arbor. Boston. p. 115-131.
- Lafite, H.R. & Edmeades, G.O. (1996). Temperature effects on radiation use and biomass partitioning in diverse tropical maize cultivars. *Field Crops Res.* (in press).
- Lafite, H.R. & Edmeades, G.O. (1994). Improvement for tolerance to low soil nitrogen in tropical maize. II. Grain yield, biomass accululation, and N accumulation. *Field Crops Res.*, 39: 15-25.
- Magrin, G.O.; Travasso, M.I.; Díaz, R.A. & Rodríguez R.O. (1997). Vulnerability of the agricultural system of Argentina to climate change. *Climate Research*. 9: 31-36.
- Martin, G. (2012). *Cultivo del Maíz*. Artículo científico. Buenos Aires, Argentina.

- Ministerio de Agricultura (MINAG). (2017). Dirección General de Información Agraria. Estadística Agraria Mensual-Diciembre. Lima, Perú.
- MINAG (2012). Principales Aspectos de la Cadena Agroproductiva. Dirección General de Competitividad Agraria. Dirección de Información Agraria.
- MINAG. (2003). Plan estratégico de la cadena productiva del maíz amarillo duro, avícola y porcícola. Lima, Perú. 108 p.
- Oram, P.A. (1989). Sensivity of agricultural production to climate change, an update. En: Climate and Food Security. IRRI Manila, The Philippines, pp: 25-44.
- Otegui, M.E. (1992). Incidencia de una sequía alrededor de antesis en el cultivo de maíz. Consumo de agua, producción de materia seca y determinación del rendimiento. Tesis Magister Scientiae. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar de Plata. Balcarce. Buenos Aires – Argentina. 93 págs.
- Parry, M.L. (1990). Climate Change and World Agriculture. London Earthscan. Parry, M; Carter, T. 1998. Climate Impact and Adaptation Assessment. A Guide to the IPCC Approach. Earthscan Publ. Ltd, London, UK. 166 p.
- Pearson, C.J. & Hall, A.J. (1984). Maize and pearl millet. In C.J. Pearson, ed. Control of crop productivity, p. 141 – 158. New York, NY, USA, Academic Press.
- Rojas, A.L.; Casas, G.A. (1987). Desarrollo de la planta y ciclo del cultivo, In Argentina. Comisión de Maíz. AACREA-Cargill. Cuaderno de Actualización Técnica 42: 13-20.
- Sadras, V. O.; Hall, A.J. & Schlichter, T.M. (1985). Kernel set of the uppermost ear in maize: I. Quantification of some aspects of floral biology. *Maydica*, 30: 37-47.
- Sánchez, C. (1994). Requerimiento Hídrico del cultivo de Papa en condiciones climáticas de la Molina. Tesis Ing. Meteorólogo. Lima - Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina.

- Schlender, W. & Roberts, M. (2010). Robust negative impacts of climate change on African agriculture. *Review of Agricultural Economics*.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2009). *Manual de Observaciones Fenológicas*. Lima, Perú. p. 41.
- Viglizzo, E.F. (1989). Diversification, productivity and stability of agroecosystems in the semi-arid pampas of Argentina. *Agricultural Systems* 31: 279-290.
- Wilkes, H.G. (1979). Mexico and Central America as a centre for the origin of agriculture and the evolution of maize. *Crop Improv*, 6(1): 1-18.
- Yzarra, W.; Trebejo, I.; Noriega, V. (2010). Evaluación del efecto del clima en la producción y productividad del maíz amarillo duro en la costa central del Perú. *Artículo científico*. Lima, Perú.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Datos climáticos del observatorio meteorológico Alexander Von Humboldt

DATOS CLIMÁTICOS DEL OBSERVATORIO METEOROLÓGICO ALEXANDER VON HUMBOLTD											
Mes	Días	Días y fecha después de la siembra	Tanque de Evaporación (mm/día)	Temperatura a Máxima (°C)	Temperatura a mínima (°C)	Precipitación (mm)	Horas de sol	Radiación (Ly/día)	Humedad Relativa (%)	Velocidad del Viento (m/s)	DATOS DEL LISÍMETRO
SET	1	1	2.5	23.7	17.0	0.0	5.9	305.9	80	1.3	0.9
	2	2	2.2	23.8	14.1	0.0	6.6	342.3	86	1.3	1.1
	3	3	2.0	22.1	17.0	0.0	0.5	195.4	87	0.9	0.8
	4	4	1.6	23.6	16.1	0.0	4.8	272.4	84	1.3	0.9
	5	5	3.4	22.9	15.6	0.0	4.0	262.2	86	1.0	0.8
	6	6	2.7	22.6	15.0	0.0	6.2	277.1	82	1.4	0.8
	7	7	2.7	21.2	16.1	0.0	0.0	195.5	87	1.0	0.8
	8	8	1.0	19.7	15.8	0.0	1.2	160.6	87	0.7	0.7
	9	9	1.9	21.9	15.5	0.0	3.1	233.5	83	0.6	0.7
	10	10	1.6	21.9	15.1	Tz	0.6	257.9	84	0.9	0.8
	11	11	1.4	19.4	15.0	Tz	0.0	166.4	89	1.3	0.7
	12	12	1.7	23.9	14.3	Tz	9.1	431.6	80	1.2	0.6
	13	13	3.7	22.9	14.3	0.0	3.7	412.7	83	1.5	0.7
	14	14	2.9	21.6	15.8	0.0	7.1	398.3	86	1.1	0.7
	15	15	2.4	19.8	16.0	0.2	0.0	150.3	92	1.0	0.8
	16	16	1.2	18.5	15.2	0.2	0.0	136.0	90	1.2	0.7
	17	17	1.4	22.5	15.0	0.0	4.0	189.6	81	1.3	0.7
	18	18	2.2	23.5	14.5	0.0	5.3	319.9	83	1.0	0.6
	19	19	1.9	22.9	16.0	0.0	6.8	249.8	85	1.5	0.5
	20	20	2.1	21.0	15.9	0.6	2.0	228.8	91	1.1	0.7
	21	21	2.6	22.3	16.2	0.0	4.7	304.6	84	1.0	0.7
	22	22	2.6	22.6	16.2	0.0	5.6	353.2	83	1.8	0.4
	23	23	2.0	19.7	15.9	0.1	0.0	132.1	88	0.8	0.8
	24	24	0.7	18.8	16.1	0.0	0.0	114.4	90	1.2	0.8
	25	25	0.5	18.9	15.5	0.0	0.0	95.9	89	0.3	0.6
	26	26	2.3	20.4	15.7	0.0	0.0	176.5	85	1.3	0.7
	27	27	1.0	18.0	15.0	0.8	0.0	92.1	93	0.4	0.6
	28	28	0.7	18.9	15.1	0.0	0.0	101.8	90	0.5	0.5
	29	29	1.2	21.7	15.5	0.2	0.0	200.1	85	1.2	0.7
	30	30	1.9	23.0	16.5	0.0	3.9	278.9	84	0.5	0.6

«continuación»

DATOS CLIMÁTICOS DEL OBSERVATORIO METEOROLÓGICO ALEXANDER VON HUMBOLTD											
Mes	Días	Días y fecha después de la siembra	Tanque de Evaporación (mm/día)	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura a mínima (°C)	Precipitación (mm)	Horas de sol	Radiación (Ly/día)	Humedad Relativa (%)	Velocidad del Viento (m/s)	DATOS DEL LISÍMETRO
OCT	1	31	3.0	23.9	14.0	0.0	7.5	399.4	80	1.8	0.8
	2	32	3.1	24.2	14.9	0.0	6.8	394.9	80	1.5	0.7
	3	33	3.1	23.8	15.2	0.0	7.6	410.1	82	1.4	0.9
	4	34	4.0	25.0	17.0	0.0	8.1	417.7	81	1.3	0.9
	5	35	1.4	19.5	16.5	Tz	0.0	142.3	91	0.8	0.9
	6	36	1.2	19.2	16.2	0.3	0.0	106.2	92	0.3	0.8
	7	37	0.7	19.5	16.4	0.2	0.0	106.0	91	0.9	0.9
	8	38	2.0	24.4	16.2	0.0	3.8	365.0	83	1.2	1.1
	9	39	2.7	23.6	17.1	0.2	3.4	283.2	83	0.7	1.1
	10	40	3.2	24.1	16.7	0.0	8.1	414.5	80	1.6	1.2
	11	41	2.7	23.2	15.9	0.0	6.0	348.6	80	1.3	1.5
	12	42	2.6	22.5	16.0	0.0	5.1	313.7	82	1.0	1.4
	13	43	2.4	23.0	16.6	0.0	4.5	321.3	83	1.2	1.5
	14	44	3.1	23.3	16.5	0.0	5.1	337.8	82	1.2	1.8
	15	45	1.7	22.5	15.5	0.0	3.3	312.3	85	1.7	1.8
	16	46	3.4	24.7	16.4	0.0	6.1	402.4	80	1.3	2.1
	17	47	2.2	21.4	16.2	0.0	4.2	295.3	88	1.1	1.9
	18	48	2.2	24.2	16.6	0.0	6.8	405.5	83	1.3	2.5
	19	49	4.8	25.6	17.1	0.0	8.6	439.8	79	1.6	2.7
	20	50	4.1	24.4	16.9	0.0	7.1	420.7	82	2.0	2.7
	21	51	1.3	20.0	16.0	0.1	0.0	107.5	91	1.0	1.9
	22	52	1.1	21.4	16.9	0.0	0.0	163.6	90	0.9	1.9
	23	53	1.1	23.2	16.0	0.3	2.1	228.7	86	1.1	2.1
	24	54	1.8	21.0	17.2	0.0	0.0	113.5	89	1.2	1.6
	25	55	1.0	19.4	16.7	Tz	0.0	91.1	93	1.2	1.6
	26	56	1.2	21.3	17.0	0.0	0.0	171.2	88	1.3	1.6
	27	57	2.5	25.4	16.9	Tz	4.8	331.5	83	1.6	2.5
	28	58	2.8	24.6	15.1	0.0	4.7	343.8	81	1.2	3.3
	29	59	3.1	24.6	17.0	0.0	8.0	429.2	79	1.6	3.1
	30	60	2.6	20.8	16.4	0.0	0.0	131.7	89	1.2	2.4
	31	61	1.3	19.1	16.1	0.3	0.0	115.2	92	1.0	1.7

«continuación»

DATOS CLIMÁTICOS DEL OBSERVATORIO METEOROLÓGICO ALEXANDER VON HUMBOLTD											
Mes	Días	Días y fecha después de la siembra	Tanque de Evaporación (mm/día)	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura a mínima (°C)	Precipitación (mm)	Horas de sol	Radiación (Ly/día)	Humedad Relativa (%)	Velocidad del Viento (m/s)	DATOS DEL LISÍMETRO
NOV	1	62	1.4	19.2	16.7	0.0	0.0	127.3	89	1.0	1.5
	2	63	1.1	19.6	16.4	0.0	0.0	107.5	85	1.4	1.7
	3	64	1.3	21.2	17.1	0.0	0.0	136.2	83	0.6	1.6
	4	65	2.2	23.4	15.9	0.0	6.5	406.8	81	1.3	3.0
	5	66	1.4	22.5	14.9	0.0	1.9	319.6	84	0.8	3.1
	6	67	2.1	23.0	16.4	0.0	0.3	272.6	78	1.2	2.2
	7	68	2.4	23.0	16.7	0.0	2.2	289.3	81	1.6	3.2
	8	69	1.6	20.3	15.9	0.0	0.0	162.4	82	0.8	2.2
	9	70	2.0	22.8	17.0	0.0	0.5	268.1	78	1.2	2.3
	10	71	3.6	25.4	16.2	0.0	9.0	450.5	77	1.9	4.4
	11	72	2.4	23.8	17.1	0.0	3.9	293.8	81	1.9	3.4
	12	73	3.0	23.6	17.0	0.0	3.6	386.1	83	1.0	3.7
	13	74	2.1	22.8	16.7	0.0	3.1	308.9	86	1.1	3.3
	14	75	0.9	20.4	16.4	0.0	0.0	132.2	88	0.9	2.4
	15	76	2.0	22.8	16.7	0.0	2.4	230.2	87	1.1	2.4
	16	77	2.0	22.6	16.7	0.0	1.0	231.7	85	0.9	2.6
	17	78	1.1	22.8	16.2	0.0	3.0	303.1	88	1.1	2.9
	18	79	2.3	23.2	16.6	0.0	0.3	269.6	87	0.7	4.0
	19	80	1.3	22.0	16.6	0.3	0.0	205.9	89	0.9	0.7
	20	81	2.2	24.2	17.5	0.0	5.4	402.5	84	2.0	3.0
	21	82	2.6	23.9	16.7	0.0	7.9	468.9	81	1.8	3.6
	22	83	1.8	20.9	17.2	0.0	0.0	160.5	89	0.5	4.0
	23	84	1.7	23.9	16.7	0.5	2.0	274.1	88	1.2	0.9
	24	85	1.7	24.0	17.5	0.0	1.8	268.0	86	1.2	2.6
	25	86	1.5	25.4	16.1	0.0	5.1	317.6	84	2.1	2.5
	26	87	5.5	23.2	16.5	0.0	0.2	239.3	88	1.4	1.4
	27	88	1.3	20.3	17.9	0.0	0.0	106.0	92	0.7	0.8
	28	89	0.3	23.7	17.6	0.5	1.0	245.3	92	1.0	0.6
	29	90	1.8	25.2	17.5	0.0	4.7	311.5	86	1.2	0.7
	30	91	4.8	24.0	17.5	0.0	6.6	405.3	83	1.5	2.3

«continuación»

DATOS			CLIMÁTICOS DEL OBSERVATORIO METEOROLÓGICO ALEXANDER VON HUMBOLTD								DATOS DEL LISÍMETRO
Mes	Días	Días y fecha después de la siembra	Tanque de Evaporación (mm/día)	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura a mínima (°C)	Precipitación (mm)	Horas de sol	Radiación (Ly/día)	Humedad Relativa (%)	Velocidad del Viento (m/s)	
DIC	1	92	1.4	23.4	17.0	0.0	0.0	243.8	84	0.4	2.1
	2	93	1.8	23.8	17.6	0.0	1.7	283.0	84	1.7	2.1
	3	94	2.3	25.3	16.9	0.2	3.4	320.7	86	0.4	2.0
	4	95	2.4	25.1	16.1	0.3	4.3	334.2	84	1.3	2.6
	5	96	2.0	24.9	17.1	0.0	5.4	335.9	78	0.4	2.5
	6	97	2.8	25.0	15.9	0.0	5.8	387.7	78	0.9	2.4
	7	98	1.7	20.8	17.4	Tz	0.0	136.3	89	0.0	2.5
	8	99	1.0	22.4	16.3	Tz	0.0	213.5	87	1.8	2.9
	9	100	3.4	29.1	15.5	0.0	8.3	439.8	74	0.9	2.5
	10	101	4.6	28.5	17.0	0.0	10.4	487.7	77	0.4	2.5
	11	102	2.6	24.5	17.7	0.0	0.0	263.8	88	2.7	2.6
	12	103	1.8	25.4	18.1	0.1	3.8	292.6	88	0.9	2.2
	13	104	2.2	21.9	18.7	0.0	0.0	175.6	91	0.9	2.0
	14	105	1.1	21.9	17.8	0.6	0.0	125.7	89	2.7	2.7
	15	106	2.4	27.0	16.8	0.0	5.3	377.4	81	0.4	2.6
	16	107	3.9	27.6	16.1	0.0	8.9	463.4	80	2.2	3.0
	17	108	2.7	25.4	19.1	0.0	2.9	283.4	84	0.4	2.9
	18	109	1.2	21.4	19.0	0.0	0.0	124.2	90	0.0	2.5
	19	110	0.9	23.8	18.7	0.1	0.0	171.1	88	0.9	2.1
	20	111	2.6	24.6	19.6	0.0	1.9	350.6	84	1.3	3.0
	21	112	2.0	22.9	18.9	0.0	0.0	189.3	89	0.0	2.9
	22	113	2.1	25.8	19.1	0.0	2.5	278.7	88	0.4	2.5
	23	114	1.0	22.9	19.1	Tz	0.0	134.8	90	0.4	2.5
	24	115	1.4	24.8	19.2	0.0	1.0	280.8	89	0.4	2.7
	25	116	2.6	26.4	19.3	0.0	2.3	288.3	84	0.9	3.2
	26	117	1.3	26.3	19.0	0.0	3.3	290.7	88	1.3	2.7
	27	118	2.3	23.5	19.4	0.0	0.0	181.7	89	0.0	3.0
	28	119	2.5	28.5	20.1	0.0	4.7	347.2	79	0.0	3.4
	29	120	4.2	28.4	19.0	0.0	11.3	498.1	77	0.9	3.4
	30	121	3.5	25.9	19.2	0.0	6.6	398.2	84	0.4	3.0
	31	122	2.0	25.4	18.9	0.0	3.2	345.0	84	0.9	2.5

«continuación»

DATOS CLIMÁTICOS DEL OBSERVATORIO METEOROLÓGICO ALEXANDER VON HUMBOLTD											DATOS DEL LISÍMETRO
Mes	Días	Días y fecha después de la siembra	Tanque de Evaporación (mm/día)	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura a mínima (°C)	Precipitación (mm)	Horas de sol	Radiación (Ly/día)	Humedad Relativa (%)	Velocidad del Viento (m/s)	
ENE	1	123	0.9	26.2	18.0	0.0	2.2	226.0	84	0.8	3.5
	2	124	5.5	28.4	16.4	Tz	9.5	473.9	73	1.0	3.7
	3	125	4.0	28.4	17.3	0.0	10.5	484.9	76	1.8	4.2
	4	126	6.4	28.1	19.0	0.0	9.6	487.7	77	1.9	4.0
	5	127	4.5	28.7	20.2	0.0	7.5	436.7	73	2.4	3.5
	6	128	4.2	29.2	19.7	0.0	10.1	481.6	75	0.9	2.7
	7	129	2.7	24.9	21.0	0.0	0.0	169.5	87	1.3	2.7
	8	130	1.2	25.2	19.1	1.3	0.0	189.0	87	1.7	1.9
	9	131	1.8	27.0	19.9	0.6	3.0	281.5	85	1.2	2.3
	10	132	3.3	27.9	18.6	0.0	6.4	399.6	82	1.2	2.2
	11	133	4.3	28.0	21.0	0.0	6.1	447.3	77	1.1	2.0
	12	134	3.6	28.3	20.4	0.0	4.8	429.3	78	1.9	2.1
	13	135	2.6	25.9	19.0	0.0	1.2	261.8	82	2.0	2.5
	14	136	1.1	24.9	20.2	0.0	0.0	162.0	87	1.1	3.1
	15	137	2.7	27.0	21.0	0.0	0.0	275.7	76	2.4	2.2
	16	138	5.1	28.5	18.5	0.0	4.4	466.0	73	1.0	1.9
	17	139	3.0	29.4	19.4	0.0	2.3	350.1	73	1.1	1.8
	18	140	4.8	29.6	19.8	0.0	10.7	492.1	75	1.5	3.0
	19	141	3.5	27.2	19.2	0.0	4.5	416.2	79	1.6	2.7
	20	142	3.4	28.4	19.0	0.0	4.1	385.0	79	1.2	2.5
	21	143	2.7	28.0	22.0	0.0	0.0	221.3	79	1.5	1.9
	22	144	3.3	29.6	20.2	0.0	2.6	341.1	82	2.0	2.0
	23	145	4.0	28.3	21.3	0.0	3.5	388.9	80	1.3	1.6
	24	146	4.8	25.0	20.9	0.0	0.0	148.2	87	0.7	2.1
	25	147	2.8	28.2	19.6	0.0	2.1	269.7	82	1.1	1.7
	26	148	5.3	30.1	21.8	0.0	5.4	414.3	74	2.0	1.9
	27	149	4.3	29.4	20.0	0.0	10.6	492.1	79	1.3	1.7
	28	150	3.5	28.4	21.2	0.0	1.4	297.6	78	1.5	1.7
	29	151	3.5	30.4	22.1	0.0	5.0	397.8	73	1.2	2.4
	30	152	3.9	29.2	21.8	0.0	2.5	410.0	79	1.7	0.9
	31	153	4.7	30.2	22.4	0.0	2.9	382.9	67	2.2	0.9

«continuación»

DATOS CLIMÁTICOS DEL OBSERVATORIO METEOROLÓGICO ALEXANDER VON HUMBOLTD											DATOS DEL LISÍMETRO
Mes	Días	Días y fecha después de la siembra	Tanque de Evaporación (mm/día)	Temperatura a Máxima (°C)	Temperatura a mínima (°C)	Precipitación (mm)	Horas de sol	Radiación (Ly/día)	Humedad Relativa (%)	Velocidad del Viento (m/s)	
FEB	1	154	2.7	28.1	20.5	0.0	0.0	294.6	83	0.8	1.4
	2	155	3.0	29.4	22.0	0.0	0.7	312.6	78	0.8	1.3
	3	156	3.2	29.9	22.9	0.0	0.7	354.5	79	1.9	0.8
	4	157	8.8	30.4	22.1	0.0	6.6	451.7	75	1.4	0.5
	5	158	4.2	31.3	20.5	0.0	7.5	415.8	73	1.2	0.9
	6	159	4.1	30.2	20.9	0.0	7.8	496.5	79	1.6	1.1
	7	160	4.2	30.5	20.5	0.0	6.2	480.1	78	1.7	1.2
	8	161	2.8	26.8	22.0	0.0	0.0	151.0	84	0.8	1.1
	9	162	2.9	29.8	21.9	0.0	4.1	360.4	79	1.0	0.2
	10	163	2.6	28.2	22.0	0.0	2.1	330.5	78	2.0	0.6
	11	164	3.6	29.3	22.2	0.0	0.0	324.5	82	1.2	0.9
	12	165	2.3	28.0	22.0	0.0	0.0	222.8	79	0.6	1.3
	13	166	3.5	31.0	22.1	0.0	5.1	462.1	71	1.4	1.7
	14	167	5.2	30.6	20.8	0.0	10.0	480.1	72	1.9	2.1
	15	168	3.8	29.3	21.0	0.0	5.7	402.3	78	1.2	2.5
	16	169	3.8	29.3	21.0	0.0	3.4	369.4	82	1.4	2.8
	17	170	4.4	30.3	21.8	0.0	8.6	483.1	74	1.1	3.2
	18	171	4.8	30.8	22.2	0.0	9.4	480.1	72	2.1	3.6
	19	172	5.0	30.4	22.0	0.0	8.8	430.7	76	2.1	4.0
	20	173	3.9	30.0	21.9	0.0	6.6	406.8	78	1.2	4.3
	21	174	3.8	30.6	21.8	0.0	3.5	370.9	77	0.7	4.7
	22	175	5.5	30.3	21.2	0.0	4.5	423.2	73	1.3	5.1
	23	176	4.7	31.3	22.2	0.0	5.7	415.8	71	3.0	5.5
	24	177	4.7	30.5	22.9	0.0	7.6	429.2	76	3.0	5.8

Anexo 2: Parámetros biométricos en las distintas etapas

PARÁMETROS BIOMÉTRICOS	ETAPAS				
	SIEMBRA AL INICIO DE EMERGENCIA	I	II	III	IV
. Duración de la etapa fenológica (días)	9	12	37	62	42
. Profundidad de raíces al finalizar las etapas (cm)	-	13.7	27.8	41.2	41.2
Días después de la siembra	9	21	58	120	162

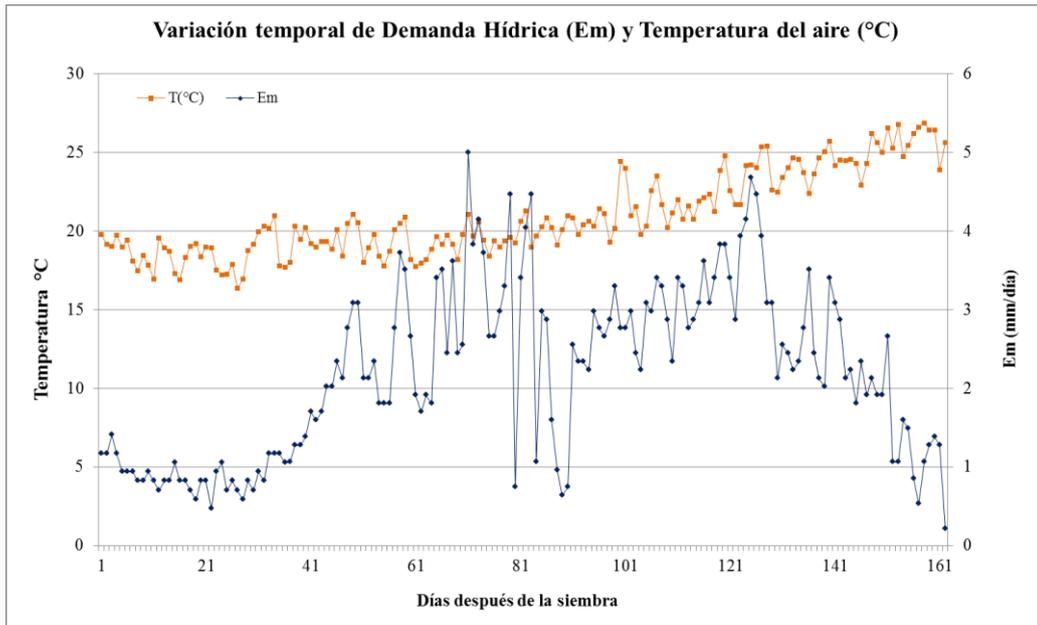
Anexo 3: Inicio, fin y duración de las fases fenológicas

FASES FENOLÓGICAS	INICIO		FIN		DURACIÓN (días)
	FECHA	DÍAS DESPUÉS DE LA SIEMBRA	FECHA	DÍAS DESPUÉS DE LA SIEMBRA	
Panoja	28/11/2015	88	01/12/2015	91	4
Espiga	02/12/2015	92	28/12/2015	118	27
Maduración Lechosa	29/12/2015	119	06/01/2016	127	9
Maduración Pastosa	07/01/2016	128	18/01/2016	139	12
Maduración Fisiológica	19/01/2016	140	09/02/2016	162	23

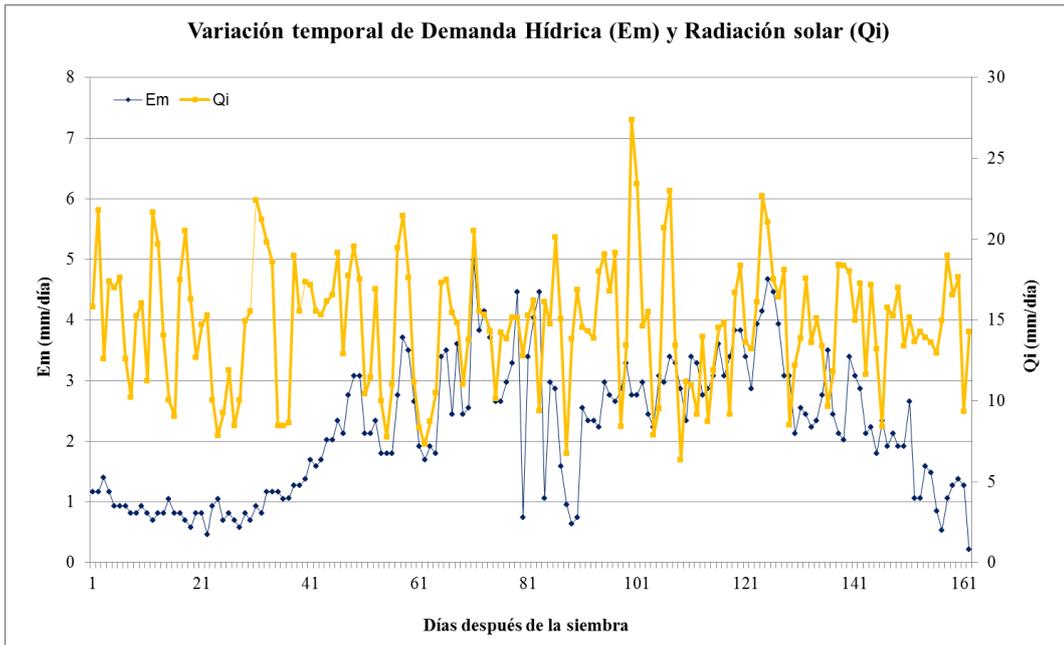
Anexo 4: Materia seca de los granos de maíz

PARÁMETROS DE COSECHA	SURCO CENTRAL 1	SURCO CENTRAL 2	SURCO CENTRAL 3	SURCO CENTRAL 4	LISÍMETRO
Nº de plantas	112	79	125	116	12
Nº de mazorcas	132	105	145	124	16
Nº de mazorcas/planta	1.2	1.3	1.2	1.1	1.3
Nº de hileras/mazorca	16.9	17.0	17.3	17.1	17.2
Nº granos/mazorca	562	545	573	557	86
Nº granos/planta	662.4	724.4	664.7	595.4	114.7
Peso de 10 mazorcas (kg)	2.27	2.20	2.30	2.29	2.30
Peso de granos de 10 mazorcas (kg)	1.85	1.62	1.86	1.78	1.87
Porcentaje de granos en mazorca (%)	81.5	73.7	80.7	77.6	81.5
Porcentaje de Humedad de granos (%)	21.4	21.1	21.0	19.7	20.0

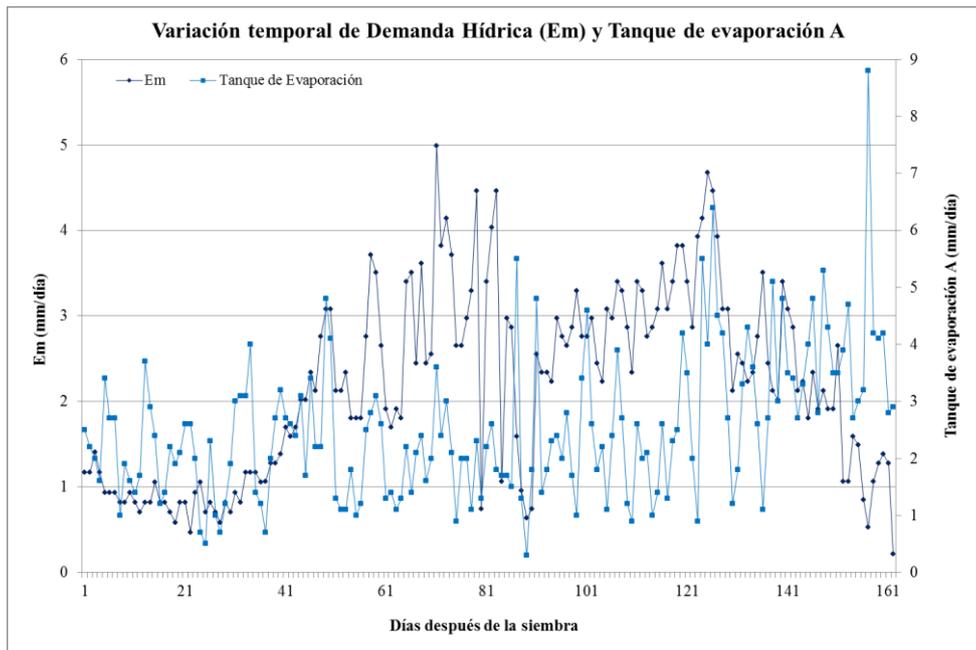
Anexo 5: Comportamiento de la demanda hídrica (Em) con la temperatura (°C)



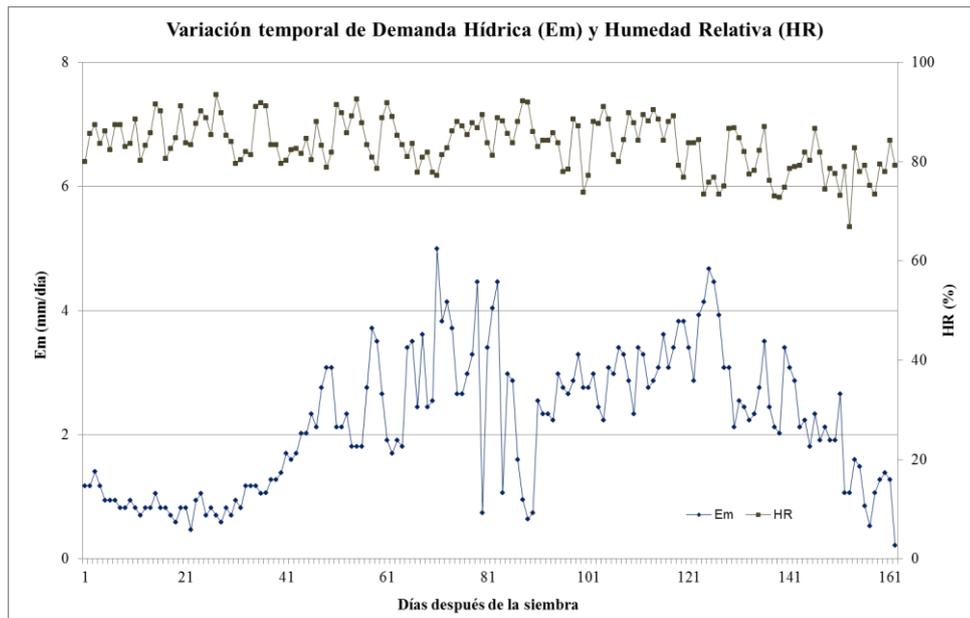
Anexo 6: Comportamiento de la demanda hídrica (Em) con la radiación solar (Qi)



Anexo 7: Comportamiento de la demanda hídrica (Em) con el tanque de evaporación



Anexo 8: Comportamiento de la demanda hídrica (Em) con la humedad relativa (%)



Anexo 9: Rendimiento del cultivo

TIPO DE RIEGO	ÁREA (m ²)	PRODUCCIÓN (kg)	RENDIMIENTO (kg/ha)
En condiciones de riego por goteo	156	196	12564.1
En condiciones de lisímetro	1.03	1.555	15097.09