

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

RIEGO DEFICITARIO EN MAÍZ

por

Fermín GARCÍA Y SANTOS POSEIRO
Sebastián LEMOS DÍAZ

**TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo**

MONTEVIDEO
URUGUAY
2017

Tesis aprobada por:

Director:-----

Ing. Agr. Luis Giménez

Ing. Agr. Sebastián Mazzilli

Ing. Agr. Oswaldo Ernst

Fecha: 28 de marzo de 2017

Autores:-----

Fermín García y Santos

Sebastián Lemos

AGRADECIMIENTOS

A Dios.

A la familia y amigos por el apoyo incondicional durante el transcurso de esta carrera.

A nuestro tutor Luis Giménez por habernos guiado y aconsejado durante la tesis de grado.

A la Lic. Sully Toledo y al personal de bedelía por su disposición para con nosotros.

A Richard Arévalo y Matías Van Der Dorpel, por el acompañamiento en las tareas de campo, también a los compañeros Beto, Camps, Canela y Ruso.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1. EL MAÍZ EN URUGUAY	3
2.2. CARACTERÍSTICAS DEL AMBIENTE DE PRODUCCIÓN	3
2.2.1. <u>Temperatura</u>	4
2.2.2. <u>Capacidad de almacenaje de agua del suelo</u>	5
2.2.3. <u>Precipitaciones</u>	5
2.2.4. <u>Radiación solar</u>	6
2.2.5. <u>Fotoperíodo</u>	6
2.3. LIMITANTES PARA LA PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA DE MAÍZ EN EL AMBIENTE DE PRODUCCIÓN DE URUGUAY	7
2.3.1. <u>Estrés hídrico</u>	8
2.3.2. <u>Radiación solar</u>	9
2.4. IMPORTANCIA DEL AGUA EN EL RENDIMIENTO	9
2.4.1. <u>Potencial de producción de materia seca</u>	10
2.4.2. <u>Potencial de producción de grano</u>	11
2.4.3. <u>Tasa de crecimiento del cultivo durante el período crítico</u>	12
2.5. DEFICIENCIAS HÍDRICAS Y PRODUCCIÓN DE GRANO.....	13
2.6. DEMANDA DE AGUA	14
2.7. RIEGO DEFICITARIO	16
2.8. EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA.....	17
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	19
3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO	19

3.2. MANEJO EXPERIMENTAL.....	20
3.2.1. <u>Tratamientos</u>	20
3.2.2. <u>Simuladores de sequía</u>	21
3.2.3. <u>Riego</u>	21
3.3. MEDICIONES EFECTUADAS.....	22
3.4. DETERMINACIONES ESTADÍSTICAS DEL EXPERIMENTO	22
3.4.1. <u>Hipótesis biológicas</u>	22
3.4.2. <u>Hipótesis estadísticas</u>	22
3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	23
3.6. CONDICIONES CLIMÁTICAS DURANTE EL EXPERIMENTO.....	24
3.6.1. <u>Precipitaciones</u>	24
3.6.2. <u>Radiación solar</u>	25
3.6.3. <u>Temperatura</u>	27
3.6.4. <u>Agua disponible</u>	28
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	33
4.1. MATERIA SECA TOTAL.....	33
4.2. EFECTO DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA SOBRE EL RENDIMIENTO.....	35
4.2.1. <u>Efecto de la disponibilidad hídrica sobre los componentes del rendimiento.</u>	37
4.3. RELACIÓN ENTRE RENDIMIENTO Y COMPONENTES DEL RENDIMIENTO.....	39
4.3.1. <u>Granos por espiga y espiga por planta</u>	42
4.3.2. <u>Número de hileras por espiga y granos por hilera</u>	43
4.4. EVAPOTRANSPIRACIÓN Y EFICIENCIA DE USO DEL AGUA	44
4.4.1. <u>Eficiencia de uso del agua</u>	46
5. <u>CONCLUSIONES</u>	48
6. <u>RESUMEN</u>	49

7. <u>SUMMARY</u>	50
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	51
9. <u>ANEXOS</u>	61

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Características físicas e hidrológicas del suelo del campo experimental de la EEMAC.	19
2. Rendimiento en grano (kg/ha) de cada tratamiento evaluado.....	35
3. Agua efectiva total por etapas y tratamiento (mm).	36
4. Número de granos por metro cuadrado (No. granos/m ²) y peso de mil granos (PMG) promedio para los diferentes tratamientos evaluados.	37
5. Número de espigas por metro cuadrado, número de granos por espiga y número de espigas por planta en los diferentes tratamientos evaluados.	42
6. Número de hileras por espiga y número de granos por hilera de los diferentes tratamientos evaluados.	43
Figura No.	
1. Precipitaciones promedio mensuales en Paysandú para la serie histórica 1980-2009, y en la temporada 2014-2015 registrado por la estación meteorológica de la EEMAC.	24
2. Radiación solar promedio (MJ/m ² /día) en la EEMAC durante la estación de crecimiento 2014-2015, y para la serie histórica 2002-2013 en Paysandú.	25

3. Radiación solar promedio (MJ/m ² /día) en la EEMAC durante la estación de crecimiento 2014-2015, y para la serie histórica 2002-2013 en Paysandú.	26
4. Radiación solar promedio (MJ/m ² /día) en la EEMAC durante la estación de crecimiento 2014-2015, y para la serie histórica 2002-2014 en Paysandú.	27
5. Temperatura promedio mensual (°C) en la EEMAC durante la estación de crecimiento, y para la serie histórica comprendida entre 1980-2009 en Paysandú.....	28
6. Evolución del porcentaje de AD en el tratamiento de bienestar hídrico en todo el ciclo durante el ciclo del cultivo.....	29
7. Evolución del porcentaje de AD en el tratamiento de riego deficitario controlado en etapa vegetativa y período crítico durante el ciclo del cultivo.....	30
8. Evolución del porcentaje de AD en el tratamiento riego deficitario controlado en período crítico y llenado de granos durante el ciclo del cultivo.....	31
9. Evolución del porcentaje de AD en el tratamiento 50 % de bienestar hídrico durante el ciclo del cultivo.....	32
10. Materia seca total (kg ha ⁻¹) a cosecha de los tratamientos.	33
11. Relación entre el rendimiento en grano (kg ha ⁻¹) y el número de (granos m ²) según cada tratamiento evaluado.....	39
12. Relación entre el peso de mil granos y el rendimiento en grano (kg ha ⁻¹) según cada tratamiento evaluado.....	41
14. Evolución de la evapotranspiración de cultivo diaria de todos los tratamientos.	44

1. INTRODUCCIÓN

El maíz es el primer cereal en rendimiento de grano por hectárea y es el segundo, después del trigo, en producción total. Es una gramínea C4 de alta actividad fotosintética, cuyo origen y evolución ha sido en la zona tropical. Se cultiva actualmente hasta los 58° de latitud norte en Canadá y en Rusia y hasta los 40° de latitud sur en Argentina y Chile. A nivel mundial el grano de maíz es de gran importancia económica, ya sea como alimento humano, como alimento para el ganado, o como fuente de un gran número de productos industriales (Paliwal et al., 2009).

Los rendimientos promedios mundiales distan de los potenciales cuando se utilizan las variedades más productivas con riego, sin deficiencias nutricionales y con óptimo manejo. Esta brecha entre los rendimientos reales y los máximos es explicada en gran parte por las deficiencias hídricas (Andrade, 1998). Cuando estas ocurren en la etapa del entorno a floración, el rendimiento se reduce significativamente por su incidencia en el número de granos principal componente del mismo (Otegui 1992, Andrade 1995, Otegui et al. 1995, Stone et al. 2001, O'Neill 2004, Giménez 2012).

En la región pampeana, los rendimientos potenciales bajo riego sin estrés abiótico en promedio rondan las 15 t/ha, mientras que en secano alcanzan las 9 t/ha promedio (Dardanelli et al., 2010). En Uruguay, Giménez (2012) estimó a partir de tres años de estudios (2009, 2010, 2011) que el rendimiento potencial bajo riego está en torno a las 15 t/ha, con variaciones que van desde 13,5 a 15,3 t/ha; en concordancia con el resultado obtenido por Callero (2014) donde el máximo rendimiento fue aproximadamente 14 t/ha.

Sawchik (2009), Giménez et al. (2014) mencionan que la mayor limitante en los cultivos de verano en secano se debe principalmente a la disponibilidad hídrica. Ésta, está determinada por la recarga de agua de los suelos que provienen generalmente de las precipitaciones (PP). Las mismas presentan gran variabilidad en volumen e intensidad, siendo importantes debido a que la capacidad de almacenamiento de agua disponible de los suelos es relativamente baja y cubre como máximo entre el 20 y 30% del consumo de agua de los cultivos.

La implementación de riego suplementario es una tecnología que complementa la oferta del ambiente en términos de precipitación efectiva y de la presencia de una napa freática, si existiera (Dardanelli et al., 2010); permitiendo aumentar la productividad media y disminuyendo la variabilidad de los rendimientos (Baethgen y

Terra, 2010). En cambio, es necesario obtener mayor información de esta tecnología que permita mejorar la adopción teniendo en cuenta los costos de implementación y mantenimiento; además de hacer un uso eficiente del agua de riego (Salinas, 2010). De esta manera se podrán utilizar las estrategias de riego más eficientes en cada situación (Giménez, 2012).

El riego deficitario controlado es una alternativa que incurre en el uso de un menor volumen de agua para mejorar la eficiencia en el uso del agua de riego en el cultivo (Ferres y Soriano, 2007). A nivel nacional la información sobre el efecto de diferentes disponibilidades hídricas en distintas etapas fenológicas en maíz y su consecuencia en el rendimiento es escasa (Giménez, 2012). El siguiente trabajo tiene como objetivo principal evaluar el riego deficitario controlado como una alternativa de manejo del riego.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. EL MAÍZ EN URUGUAY

En Uruguay, la región agrícola se concentra casi exclusivamente en el litoral oeste (desde el sur de Paysandú hasta Colonia), asociado a suelos más aptos para la producción (MGAP. DIEA, 2015). El fenómeno de la “veranización” de la agricultura a principio del siglo XXI, impulsado por la soja, trajo consigo fuertes cambios; tales como la intensificación del uso de la tierra y la aparición de nuevos actores que llevaron a una expansión del área agrícola hacia zonas no tradicionales (zona centro y noreste del país, Arbeletche et al., 2010).

Saavedra (2011), señala que la siembra del cultivo de maíz en el país históricamente ha sido superior a 150 mil hectáreas, pero en las últimas 28 de las 29 zafra, el área cultivada se ha ubicado entre 40 y 100 mil hectáreas por año. En la zafra 2014-2015 el área sembrada en el país fue de 83000 hectáreas, con una producción de 478 mil toneladas, cuyo rendimiento medio fue de 5761 kg/ha (MGAP. DIEA, 2015).

2.2. CARACTERÍSTICAS DEL AMBIENTE DE PRODUCCIÓN

La productividad de los cultivos es determinada mediante complejas interacciones entre el clima y los procesos ecofisiológicos que estos conllevan. La temperatura del aire, la radiación solar y el agua regulan los procesos metabólicos y ecofisiológicos en las plantas (Ruiz et al., 2008).

Los factores que determinan el clima en Uruguay son, la ubicación geográfica en el continente, su posición con relación al océano Atlántico, el relieve de su territorio y zonas circundantes y la circulación atmosférica regional. Desde el punto de vista térmico queda definido como templado a subtropical (Durán et al., 1999).

2.2.1. Temperatura

La temperatura constituye uno de los factores que afecta la tasa de crecimiento del cultivo (TCC), ya que interviene en las tasas de respiración y de fotosíntesis. A pesar de ello, el mayor efecto radica en la modificación de la duración de las distintas fases fenológicas del cultivo (Fassio et al., 1998).

Las dos grandes etapas fenológicas en maíz (vegetativa y reproductiva) pueden tener temperaturas cardinales diferentes (Ruiz et al., 1998), sin embargo en la mayoría de los procesos fenológicos la temperatura base es de 8 a 10° C, la temperatura óptima es de 30 a 34° C y la temperatura máxima es de 40 a 44° C (Bolaños et al., 1993). Fassio et al. (1998), realizaron estudios en INIA La Estanzuela, Colonia, en donde se concluye que las temperaturas promedio del suelo descubierto a 5 cm de profundidad de todo el año, están por encima de la temperatura base para la emergencia y germinación del maíz. Sin embargo, los autores toman un umbral de seguridad para estas etapas de 12°C, por lo cual a partir del mes de agosto no habría limitaciones para la siembra de maíz temprana en Uruguay.

Según los datos estadísticos realizados por INUMET (2014a) la temperatura media del país en primavera en los últimos 10 años (2004-2013) fue de 17,5° C, oscilando entre los 18,7° C (Artigas) y 15,1° C (Rocha). Las temperaturas máximas medias rondan los 22,4° C y las mínimas medias los 11,4° C, ambas con una distribución descendente en sentido norte-sur.

En verano hay un aumento de 6° C con respecto al valor medio estacional de la primavera siendo el valor medio de unos 23,1° C, en Artigas y Salto 24,7° C, y en Rocha 21,3° C. En esta estación el valor máximo medio se corresponde a 29° C y las temperaturas mínimas medias rondan los 17° C, con la distribución descendente de norte a sur característica del país (INUMET, 2014b).

Teniendo en cuenta las temperaturas de primavera-verano de Uruguay y las temperaturas cardinales, se puede concluir que no hay limitantes en ese aspecto para el crecimiento y desarrollo del cultivo. Las limitantes de esta variable están asociadas a las altas temperaturas nocturnas ya que incrementan las tasas de respiración reduciendo el peso seco acumulado durante el día por la fotosíntesis y afectando el crecimiento (Fassio et al., 1998).

2.2.2. Capacidad de almacenaje de agua del suelo

En los suelos del Uruguay predominan grandes áreas de Molisoles cuyas características son la presencia de un horizonte superficial oscuro, bien estructurado en condiciones naturales, con dominancia de arcillas de carga permanente y ricos en materia orgánica. Además, es importante destacar la presencia generalizada de horizontes subsuperficiales de textura fina y de carácter iluvial a escasa profundidad. Esto conlleva a suelos con un horizonte B argílico casi siempre presente, con alto contenido de arcilla y poco permeable, lo que genera suelos con poca capacidad de agua disponible en relación a las necesidades del cultivo (Durán et al., 1999).

La capacidad de almacenaje de agua disponible (CAAD) del suelo cumple el rol de reservorio de agua para el crecimiento de los cultivos y es el regulador del ciclo hidrológico de los mismos (García Petillo et al., 2013). Molfino y Califra (2001) destacan que aproximadamente un 30 % de la superficie del país posee tierras con CAAD entre 40-80 mm mientras que el resto del territorio entre 80-160 mm. Esta última cubren aproximadamente entre un 25 a 33 % de los requerimientos de un cultivo de maíz de alto potencial (Sawchik et al., 2010).

Para la producción potencial del maíz en nuestras condiciones, la CAAD es un factor limitante. Por este motivo las PP que ocurran durante el PC de los cultivos son la principal determinante del rendimiento final (Ernst et al., 2009).

2.2.3. Precipitaciones

La precipitación acumulada anual en el país se sitúa entre 1200 y 1600 mm, presentando un gradiente incremental de suroeste (departamento de Colonia) a noreste (departamentos de Rivera y Artigas). Los acumulados medios mensuales varían entre 60 mm/mes (litoral oeste en invierno) y 140 mm/mes (noroeste en abril y octubre), lo cual sugiere que no esté definido claramente ni una estación seca ni una estación lluviosa (Castaño et al., 2011).

Durán et al. (1999), señalan que no se percibe una diferencia significativa y sistemática en la distribución mensual de las lluvias a lo largo del año siendo en promedio 100 mm mensuales. Sin embargo, la variabilidad interanual es la dominante con amplitudes de 500 mm y más (Baethgen y Terra, 2010). La irregularidad entre años se aprecia través de valores anuales extremos tan bajos como 600 mm (1916) y tan elevados como 1.785 mm (1914), determinando ocurrencias de sequías importantes alternadas con períodos grandes de excesos en términos de lluvia, a veces concentrados (Durán et al., 1999).

Generalmente durante el verano se dan deficiencias de agua entre 180 a 240 mm (García, 2010) siendo provocado por una evapotranspiración estival elevada y una mayor intensidad de las lluvias durante ésta estación. Esto último causa una disminución en la infiltración que se traduce en un mayor escurrimiento del agua precipitada (Durán et al., 1999).

2.2.4. Radiación solar

La radiación solar interceptada por un cultivo es de los factores más importantes que influye en el crecimiento de las plantas. La misma provee de energía a la planta para sus procesos metabólicos, tal como la fotosíntesis (Campillo et al., 2012). La llamada radiación visible del espectro, es aquella energía solar de longitud de onda entre 400 y 700 nanómetros que es utilizada por el maíz (Fassio et al., 1998). La producción de materia seca (MS) se vincula estrechamente con la capacidad de utilizar la radiación solar incidente por parte del cultivo, de la posibilidad del canopeo para interceptarla y la eficiencia del cultivo para transformarla (Sadras et al. 2000, Campillo et al. 2012).

La irradiación global diaria promedio en el Uruguay es de 15,9 MJ/m². La variación estacional es importante, los mínimos valores se presentan en el mes de junio en torno a 7,6 MJ/m², y los máximos rondan los 24,1 MJ/m² en verano. La variación espacial en el país es menor a la mencionada anteriormente debido a su relativa uniformidad territorial, la cual es de 2,9 MJ/m². La mayor irradiación se percibe en la zona norte (Artigas, Rivera, Salto, Paysandú), mientras que la zona costera sur (Rocha, Maldonado, Montevideo) resultan los menores valores (Abal et al., 2010). La causa de ello es producto de una menor nubosidad, humedad relativa y mayor insolación astronómica por su menor latitud (Castaño et al., 2011).

2.2.5. Fotoperíodo

Las condiciones ambientales de temperatura y fotoperíodo determinan de qué manera un cierto material genético de una especie de interés agronómico crece y se desarrolla en un ambiente dado (Andrade y Sadras, 2000b). El maíz es una especie que tiene respuesta al fotoperíodo de día corto cuantitativo por lo cual la velocidad de desarrollo hacia la floración se reduce a medida que el largo de día se incrementa (Sadras et al., 2000). El umbral o fotoperíodo crítico del maíz ronda las 12 a 13 h. Se constata una gran variabilidad genotípica en cuanto a la respuesta fotoperiódica,

los híbridos de ciclo largo provenientes de ambientes sub-tropicales con madurez tardía tienen respuesta a las condiciones fotoperiódica; en cambio aquellos materiales que se originan en climas templados con ciclo corto a intermedio son neutros al fotoperíodo (Ellis et al., 1992).

2.3. LIMITANTES PARA LA PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA DE MAÍZ EN EL AMBIENTE DE PRODUCCIÓN DE URUGUAY

La acumulación de biomasa vegetal surge del balance entre las pérdidas por respiración y del proceso de fijación de CO₂ (Cirilo et al., 2015). La cantidad de radiación interceptada y la eficiencia de conversión determinan la producción de MS de los cultivos. Los factores que definen qué cantidad de radiación intercepta un cultivo son el área foliar, la orientación de las hojas y la duración de las mismas (Paliwal et al. 2009, Campillo et al. 2012).

En particular, el maíz frente a otros cultivos posee ventajas comparativas que establecen que sea más eficiente convirtiendo radiación en biomasa. El metabolismo C4 le confiere entre un 30 y 40% más de actividad fotosintética respecto a un C3, ya que no presenta fotorrespiración detectable (Hesketh, citado por Andrade et al., 2000a). La posición erectófila de las hojas permite una mejor distribución de la radiación en el perfil del cultivo, aumentando la fotosíntesis en los estratos inferiores. La duración de la cobertura por más tiempo respecto a otros cultivos extensivos le confiere un 95% de interceptación hasta aproximadamente madurez fisiológica. Por último, el órgano de interés agronómico tiene como atributo ser menos costoso en términos energético respecto otros cultivos de verano. Esto se explica por su conformación de 84,5% de carbohidratos que le permite convertir con 1,4 gramos de glucosa en 1 gramo de grano (Andrade 1995, Andrade y Sadras 2000b).

La producción de biomasa total acumulada hasta madurez fisiológica está sujeta a la TCC (Fisher y Palmer, citados por Andrade et al., 2000a). Esta última se encuentra condicionada a los diferentes estreses que pueden actuar secuencial o simultáneamente durante el ciclo de un cultivo. La magnitud de ellos dependerá de su duración e intensidad cercana al período crítico (PC) de rendimiento debido al efecto sobre el principal componente de rendimiento, número de granos (NG) (Otegui, 2009).

2.3.1. Estrés hídrico

En agricultura de secano, todos los cultivos extensivos en algún momento de su ciclo la absorción de agua no satisface las pérdidas que se producen debido a la transpiración ocasionada bajo una demanda atmosférica normal, lo cual se traduce en estrés hídrico (Otegui, 2009). Este es el factor principal en reducciones del rendimiento en estas condiciones (Boyer, 1982).

Sawchik y Formoso (2000b) mencionan que en Uruguay en los meses de verano es frecuente que se produzcan deficiencias hídricas, la gran variabilidad de las PP junto con la CAAD del suelo (Molfino y Califra, 2001) determinarán la importancia del mismo entre años generando una inestabilidad de la producción característica en el país. Cardellino y Baethgen (2000) señalan que en el país la productividad del maíz asiduamente está limitada por deficiencias hídricas de intensidad variable.

Giménez y García Petillo (2011) reportan que las necesidades hídricas de los cultivos se pueden cuantificar en base a la estimación de la evapotranspiración de cultivo (ETc) y la evapotranspiración real (ETr) en agricultura de secano. Estos autores estimaron para dos localidades contrastantes (Salto y Colonia) y durante 24 años, que en los meses de verano existen deficiencias hídricas las cuales se calcularon como la diferencia entre la ETc y la ETr, estimado por el modelo WinIsareg. La magnitud de las deficiencias encontradas fue mayor en Colonia (308 mm) que en Salto (171 mm) explicado por una mayor longitud del ciclo del cultivo en la primera localidad.

Las fechas de siembra que desplacen el PC hacia los meses donde las demandas atmosféricas sean inferiores a las máximas, no implican incrementos estables en los rendimientos (Andrade 1995, Giménez 2012). El retraso en la siembra de maíz determina condiciones no óptimas de radiación y temperatura durante el PC, esto conlleva a una menor TCC y menor número de espiguillas viables, afectando el NG. (Andrade et al., 1996a). En Balcarce, Argentina siembras tardías resultaron en una disminución en el componente NG del 20 al 54% para las siembras de noviembre y diciembre respectivamente en un cultivo sin limitantes hídricas ni nutricionales (Andrade, 1995).

Los factores como agua y nitrógeno son los más limitantes en la producción agrícola en gran parte del mundo, especialmente en zonas áridas y semiáridas (González-Dugo et al., 2010). Paliwal et al. (2009) señalan que en la producción de maíz tropical el déficit nitrogenado precede en importancia al déficit hídrico. Cuando el agua no actúa como factor limitante manejada por ejemplo a través del riego, la nutrición será el factor determinante para realizar el uso más eficiente de los recursos del ambiente (Salvagiotti, 2014).

2.3.2. Radiación solar

La radiación total incidente en un cultivo queda definida por la latitud, la época del año y la estación de crecimiento (Giménez, 2014). La producción de biomasa es directamente proporcional a este factor en ausencia de otras limitantes (Andrade et al., 1996a). La radiación solar incidente es menor en los años “Niño” en los cuales las PP son mayores al promedio y menor en los años “Niña”, donde las PP están muy por debajo del promedio (Giménez y García Petillo, 2011).

Andrade y Sadras (2000b) mencionan que en climas templados el ritmo de acumulación de biomasa puede variar de acuerdo a prácticas de manejo como fecha de siembra debido a un cambio en la cantidad de radiación interceptada en la estación de crecimiento. Estos autores señalan que cuando la estación de crecimiento del cultivo en maíz se acorta debido a un retraso en la misma, el menor número de días en alcanzar la intercepción máxima compensa relativamente el aprovechamiento de la oferta radiactiva. Sin embargo, bajo estas condiciones la TCC y por tanto de acumulación de MS, son mayor previo a floración y menor luego de la misma.

2.4. IMPORTANCIA DEL AGUA EN EL RENDIMIENTO

El mayor rendimiento fotosintético C4 en maíz resulta de los menores requerimientos hídricos para la producción de MS (Medrano et al., 2007). Sin embargo, esto no significa que las plantas con este mecanismo sean más tolerantes al estrés hídrico severo que las C3 sino que son más eficientes en el uso del agua (Benavides, s.f.)

La sequía provoca daños en las plantas y es causada por la falta de lluvia por un periodo tal que agote el agua disponible del suelo para el cultivo, la cual se encuentra retenida entre los potenciales que se corresponden con el límite superior o capacidad de campo (CC) y el límite inferior o punto de marchitez permanente (PMP) (Otegui, 2009). Cuando una planta experimenta estrés hídrico como sequía, no solo se afecta el contenido de agua, la turgencia de los tejidos, sino que también el cierre estomático. Esto último limita el intercambio gaseoso, declina la fotosíntesis neta y la TCC (Rahaman et al., 2012).

Andrade et al. (1996a) mencionan que la producción de MS de un cultivo es en función del agua transpirada y de la eficiencia de conversión del cultivo en cuestión.

Estos autores señalan que cualquier déficit de agua que reduzca la transpiración implicara una menor producción de biomasa. Asimismo, Dardanelli et al. (2003) especifican que cuando estos son prolongados en los estadios definidos como críticos para la determinación del rendimiento, se reduce la producción de granos debido principalmente a una disminución del índice de cosecha.

Cakir (2004) realizó estudios sobre el efecto de déficit hídrico en distintas fases del ciclo en maíz y encontró que la altura de la planta disminuye durante la etapa de rápido crecimiento vegetativo. Además, el IAF se reduce ante la presencia de estreses hídricos en las etapas de crecimiento vegetativo y panojamiento debido a un menor tamaño de las hojas.

Las deficiencias hídricas actúan sobre la cobertura del cultivo a través de la reducción en el crecimiento foliar, la aceleración de la senescencia y disminuye el área foliar activa. Esto reduce la proporción de radiación incidente interceptada afectando negativamente la producción de biomasa (Otegui et al., 1995). Asimismo, este estudio reportó que los granos/m² y el rendimiento estuvieron relacionados con la ETc durante el período entorno a floración femenina. Las deficiencias hídricas en dicha etapa resultaron en reducciones de 4,7 granos/m² y 17,7 kg/ha por cada mm disminuido de ETc.

Durante las etapas de formación de espiga y R3 (grano lechoso) de la escala fenológica de Ritchie y Hanway (1982) el estrés hídrico provocó pérdidas tempranas de las hojas inferiores por senescencia, disminución del peso seco y rendimiento en grano (Cakir, 2004). Esto ocurre como consecuencia de la menor radiación interceptada siendo el peso de grano el componente más afectado (NeSmith y Ritchie, 1992).

2.4.1. Potencial de producción de materia seca

Giménez (2012) durante tres años de estudio cuantificó la producción de biomasa en condiciones sin limitantes hídricas ni nutricionales, libres de malezas y plagas, con una población de 100000 plantas/ha a una distancia entre hileras de 0,7 m. En años caracterizados como “Niña” registró una producción de MS total cercana a los 24000 kg/ha, mientras que en años “Niño” la producción alcanzó aproximadamente 20000 kg/ha. Callero (2014) reportó una producción promedio superior a 25000 kg/ha en un año catalogado como “Niña”.

Puiatti et al. (s.f.) encontraron similares producciones en Córdoba, Argentina donde sin limitantes hídricas la producción de MS alcanzó 26000 kg/ha. Sin embargo, Rivetti (2007) en la misma localidad encontró cantidades superiores que en promedio estuvieron alrededor de los 34628 kg/ha para los tratamientos con riego y en secano

20404 kg/ha. La diferencia entre ambos experimentos se explica por el régimen hídrico del año donde en el 2007 se partió de 181 mm de agua en el suelo en 60 cm de profundidad y durante el PC las PP totales fueron de 314 mm.

Cakir (2004) en sus estudios presenta datos de producción de biomasa en un rango entre 23000-30000kg/ha. Como ha sido mencionado anteriormente, las diferencias entre años y localidades se explican debido a que la producción de biomasa es directamente proporcional a la radiación interceptada cuando no existen limitantes hídricas ni nutricionales (Andrade et al. 1996a, Giménez 2014).

2.4.2. Potencial de producción de grano

El rendimiento potencial es aquel teóricamente alcanzable que se obtiene en un ambiente determinado el cual está sujeto a factores no modificables como radiación solar, temperatura, suelo y aquellos modificables como fecha de siembra, fertilización densidad, entre otros (Salvagiotti 2009, Giménez 2012).

En nuestras condiciones, los rendimientos máximos promedio reportados por Giménez (2012) en 3 años (2009, 2010 y 2011) variaron entre 13500 y 15300 kg/ha utilizando una población de 100.000 pl/ha. Carter y Petrella (2013), Callero (2014) rondaron los 14000 kg/ha, con 80.000 pl/ha y 100.000 pl/ha, respectivamente. Las condiciones registradas en el trabajo de Carter y Petrella (2013) durante el PC mostraron altos niveles RS y condiciones de baja PP que dio lugar a mayor cantidad de días con menor nubosidad. Sin embargo, para Callero (2014) en el PC las PP estuvieron concentradas en el mes de diciembre mientras que en enero se registró una RS mayor a la media.

En tanto Ceriani e Inella (2012) obtuvieron con una población de 90.000 pl/ha un rendimiento máximo promedio de 11200 kg/ha. Estos autores estiman que la diferencia con el rendimiento potencial reportado por Giménez (2012) se debió a la falta de agua de riego durante el PC.

Andrade et al. (1996a) señalan que en condiciones sin limitantes hídricas ni nutricionales existe una respuesta positiva entre población y rendimiento. Salvagiotti (2009) reporta que sin las limitantes mencionadas las densidades óptimas recomendadas están entre 90.000 y 100.000 plantas/ha en cultivares de alto potencial. Giménez (2000) no menciona una densidad óptima ya que con 120 mil plantas y la mayor fertilización logro los rendimientos más altos. En contraposición, Carter y Petrella (2013), Rameau y Van Den Dorpel (2016) concluyen que la densidad óptima bajo riego está supeditada a la prolificidad del material genético y las características del ambiente de producción,

estos últimos obtuvieron un rendimiento máximo de 14000 kg/ha utilizando poblaciones de 60000 pl/ha y 120000 pl/ha.

2.4.3. Tasa de crecimiento del cultivo durante el período crítico

El maíz es una especie en la cual una vez que el meristema apical es transformado de vegetativo a reproductivo las estructuras vegetativas cesan de producirse. Este hábito de crecimiento determinado da una mayor importancia relativa a la floración ya que posee escasa compensación (plasticidad) por pérdidas de estructuras reproductivas ante condiciones desfavorables (Andrade y Ferreiro 1996b, Sadras et al. 2000). Por lo antes mencionado, es que las prácticas de manejo se orientan a proporcionar las mejores condiciones posibles en la etapa crítica de rendimiento (alrededor de la floración femenina) de manera de alcanzar la máxima TCC y consecuentemente la producción de grano (Andrade et al. 1996a, Andrade et al. 2000a, Giménez 2001, Salvagiotti 2009).

La variación en la disponibilidad de recursos por planta no afecta en gran medida el potencial de flores por individuo en el cultivo considerando la primera y segunda espiga (Valentinuz et al., citados por Andrade et al., 2000a). De esta manera, lo importante es la supervivencia de las espiguillas y granos ya que determinarán el NG por espiga, componente principal del rendimiento que está altamente correlacionado con la tasa de crecimiento por planta (TCP) alrededor de la floración (Andrade et al., 1996a).

Andrade et al. (1996a) señalan que esta relación entre el NG y la TCP alrededor de floración es curvilínea, la cual presenta un umbral de 1 g/d por debajo del cual no hay producción de grano. Similares umbrales son reportados por Borrás et al. (2007) entre 0,9 y 1,3 g/d debajo del cual no hay formación de grano. El alto umbral requerido en maíz comparado con otros cultivos es debido a que la espiga es una fosa débil por ser una estructura axilar relegada en la planta; siendo objeto de una dominancia apical por parte de la panoja y el tallo en floración (Andrade et al. 2000a, Paliwal et al. 2009).

Giménez (2012) menciona que en presencia de estrés hídrico en el PC la TCP disminuyó 33% afectando en mayor dimensión el NG por metro cuadrado en un 48%, no teniendo significancia en el peso de grano. A su vez, Zinselmeier et al. (1995) demostraron que un contenido de reservas alto no es suficiente para sobrellevar una disminución de la TCP debido a un estrés hídrico o la inhibición de la fotosíntesis.

Andrade et al. (2000a) expresan que los valores de los umbrales presentan variabilidad genética donde se identifican materiales prolíficos y poco prolíficos. En los primeros con una menor TCP logran dos espigas viables (4 g/d) y un valor máximo (6 g/d) para la producción de granos en una segunda espiga en materiales poco prolíficos.

Rameau y Van Den Dorpel (2016) reportan para un material prolífico un umbral de 4,7 g/d similar resultado al observado por Carter y Petrella (2013).

2.5. DEFICIENCIAS HÍDRICAS Y PRODUCCIÓN DE GRANO

Las deficiencias hídricas en las distintas etapas del cultivo del maíz influyen de manera diferencial en el rendimiento. Así, el entorno de la floración queda definida como la etapa más crítica, seguido de la etapa de llenado de granos y la fase vegetativa (Andrade et al. 2000a, Cakir 2004, Giménez 2012).

Giménez (2012) reporta ante deficiencias hídricas una reducción del rendimiento de aproximadamente 50 % en el PC y 30 % en la etapa de llenado de granos. Asimismo, Suero et al. (2000) en Balcarce encontraron reducciones del rendimiento en torno a 34 % cuando las deficiencias hídricas estuvieron ubicadas entre V12–R2 siendo principalmente explicado por la caída en el NG (28 %) respecto al testigo con riego.

En la etapa llenado de grano el componente más afectado ante la presencia de un déficit hídrico es el peso de grano (NeSmith y Ritchie, 1992). Suero et al. (2000) mencionan que puede llegar a reducirse significativamente el peso de los granos aproximadamente 26 %, lo cual determina en gran parte la disminución del rendimiento (29 %). NeSmith y Ritche (1992) determinaron que cuando el maíz fue sometido a déficit hídrico en esta etapa la senescencia foliar se adelantó resultando en menor biomasa acumulada a fin de ciclo (entre 23 y 36 % menos comparado con el testigo regado). Además, observaron que en la fase lineal de la misma la presencia de estrés hídrico reduce la duración, no obstante, la TCC no se modificó significativamente.

Hall et al. (1982) señalan que bajo estrés hídrico entorno a floración existen dos efectos sobre la disponibilidad de polen. Por un lado se reduce la duración en que los estigmas están receptivos al polen y por otro, disminuye la tasa de producción de polen en el periodo en el cual los estigmas estuvieron receptivos. Las pérdidas de rendimiento se deben a los efectos que este ejerce sobre formación, funcionalidad y cuaje de los granos (Andrade y Sadras, 2000b).

Setter et al. (2001) observaron que en presencia de déficit hídrico en pre y post polinización se inhibió el crecimiento de granos, reduciéndose más cerca del ápice que de toda la espiga. El déficit hídrico en ambas etapas manifestaron incrementos de ácido abscísico (ABA) en todas los tejidos reproductivos. En la etapa de post polinización se incrementó más en los tejidos del ápice que en los basales correspondiendo esto a

pérdidas de granos.

En estudios realizados por Boyle et al. (1991) en condiciones de déficit hídrico alrededor de la anthesis adjudicaron el aborto de los granos fecundados de maíz a la disminución en el suministro de fotosintatos dada la reducción de fotosíntesis en estas condiciones. Sin embargo, Zinselmeier et al. (1995) reportan que la falla reproductiva se debe al bajo potencial hídrico en planta que causa una interrupción del flujo de glucosa desde la fuente hacia los ovarios; provocando abortos de cigotos y en algunos casos se puede eliminar la formación de granos completamente.

Diversos estudios han cuantificado el efecto del déficit hídrico durante la etapa de llenado de grano, donde las pérdidas de rendimiento son de menor magnitud ya que el componente afectado en mayor medida es el peso de grano y no el NG (NeSmith y Ritchie 1992, Andrade y Sadras 2000b, Giménez 2012).

2.6. DEMANDA DE AGUA

La cantidad de agua disponible en el suelo determina la producción de biomasa en cualquier cultivo o comunidad vegetal; la producción de un gramo de biomasa implica el costo de determinada cantidad de agua (100 a 1000 g). El tipo de planta (mecanismo fotosintético C3 o C4) en conjunto con las condiciones ambientales determinará el valor exacto que se requiere para producirlo (Medrano et al., 2007).

Se denomina evapotranspiración (ET) a la pérdida continua de agua del suelo hacia la atmósfera, mediante la evaporación desde la superficie del cultivo o el suelo y la transpiración de la planta (García Petillo et al., 2013). Allen et al. (1998) señalan que la misma se encuentra afectada por varios factores climáticos tales como la radiación, humedad relativa del aire, temperatura y velocidad del viento. Además, está influenciada por factores de suelo como la disponibilidad de agua, factores de cultivo como el estado fenológico, el tipo de cultivo y la tecnología aplicada en cada situación productiva (Pereira y Alves, 2005).

Allen et al. (1998) establecen que los cultivos bajo condiciones estándar para FAO presentan una ET que se denomina evapotranspiración del cultivo (ETc), considerando que el cultivo se encuentra bajo un manejo óptimo y que alcanza su rendimiento potencial. Los cultivos que crecen y se desarrollan bajo condiciones no estándar tienen una ET denominada por FAO como ETc ajustada (Allen et al., 1998) que en situaciones de campo es probable que sea menor que la ETc debido a diversas limitantes ambientales y de manejo y se le llama generalmente evapotranspiración real

(ETr).

La ETr se corresponde con las demandas de agua de los cultivos (Pereira y Alves, 2005) las cuales varían en el transcurso del ciclo ontogénico del mismo, difieren entre especies, entre cultivares y entre ambientes (Andrade y Sadras, 2000b). Giménez y García Petillo (2011) señalan que el consumo de agua por parte de un cultivo se explica principalmente por la demanda atmosférica, la ocurrencia de PP, la CAAD de los suelos y las características morfo-fisiológicas del cultivo.

Andrade et al. (2000a) señalan que para que ocurra la germinación en maíz las semillas deben absorber entre 30–40% de su peso en agua. Asimismo, Shaw, citado por Fassio et al. (1998) menciona que con 10% de saturación de agua en suelo no se evidencia germinación, mientras que a medida que aumenta la humedad se incrementa la misma hasta llegar a 80 % de saturación. En tanto Braunack, citado por Fassio et al. (1998) encontró que la mayor emergencia surge de una cama de siembra fina permitiendo un mayor contacto semilla-suelo y que el mismo tenga un contenido inicial de agua 25 %.

Giménez (2001) señaló que a partir del estado V6 hasta panojamiento, los requerimientos de agua y nutrientes se cuadruplican debido a una mayor actividad metabólica en planta y alargamiento de entrenudos en esta etapa. Los máximos requerimientos hídricos se manifiestan antes y durante la etapa reproductiva, decayendo hacia madurez fisiológica. Durante la etapa del PC, sin limitantes hídricas el consumo de agua representa entre 38 y 40 % del total de agua consumida, seguido de la etapa llenado de granos y la vegetativa (Giménez, 2012).

Las relaciones de consumo varían conforme se presenten deficiencias hídricas en las distintas etapas del cultivo. Es por ello que Kresovic et al. (2016) en un experimento de tres años encontraron que los valores de ETr máximos ocurrieron en los tratamientos sin deficiencias hídricas, en cambio aquellos tratamientos que provocaron algún déficit durante el ciclo del cultivo la ETr fue menor (Bouazzama et al. 2012, Kresovic et al. 2016).

Payero et al. (2006), Kresovic et al. (2016) reportan una relación lineal entre rendimiento y agua consumida (ETr mm); donde los mayores rendimientos son obtenidos mediante una restitución total de la ETr. Fassio et al. (1998), Giménez (2012) determinan que el maíz requiere transpirar entre 450-600 mm para cumplir con lo anteriormente expuesto. Cardellino y Baethgen (2000) utilizando el modelo de CERES Maize analizando una serie de más de 30 años encontraron que en Colonia los valores de ETc diarios frecuentemente oscilan entre 5,75 mm y 6,25 mm demandando riegos entre 150 a 280 mm.

Giménez y García Petillo (2011) hallaron que la ETc diaria en Salto respecto a

Colonia era mayor pero que en promedio los valores de ETC total eran menores en el norte (536 mm) que en el sur (672 mm) debido a una mayor temperatura media que acorta el ciclo del cultivo en Salto. Sin embargo, esta diferencia no ocurrió cuando se compararon las ETr ya que en la primera localidad los balances hídricos de suelos presentaron mayor disponibilidad hídrica junto con un menor largo de ciclo siendo la ETr en ambos ambientes de 365 mm.

2.7. RIEGO DEFICITARIO

English et al. (1990), Giménez (2012) afirman que es imprescindible para el uso de esta tecnología entender completamente como los diferentes niveles de estrés hídrico en los distintos momentos del ciclo anual afectan el objetivo productivo.

El riego deficitario surge de la necesidad de gestionar el uso del agua en la agricultura y se basa en someter al cultivo a déficit hídricos a lo largo de su ciclo; mediante la aplicación de riego por debajo de las necesidades totales hídricas del cultivo (evapotranspiración), atendiendo la sensibilidad de la planta a los mismos tanto en su intensidad y duración (Ferres y Soriano 2007, Girona et al. 2014).

El principio detrás de esta tecnología es maximizar la productividad del agua en vez de maximizar el rendimiento. El uso del agua se optimiza atendiendo a través del riego a las etapas más sensibles al déficit hídrico, fuera de las mismas el riego es limitado (Geerts y Rae, 2009). En los casos en que el déficit hídrico sea inducido en las etapas no críticas el criterio de riego es evitar reducciones significativas de rendimiento aunque el crecimiento normal de las plantas resulte afectado (Ferres y Soriano, 2007). Payero et al. (2009) resaltan la relación lineal existente entre la materia seca en planta y el rendimiento, de modo que un estrés hídrico en la etapa vegetativa reduce la MS de la planta limitando el rendimiento potencial. Es por ello que el autor plantea la necesidad de adoptar técnicas de irrigación flexibles a diferencia de un sistema de riego pre-concebido.

Payero et al. (2006), Payero et al. (2008), Payero et al. (2009) señalan que el riego deficitario estabiliza e incrementa los rendimientos comparando con los obtenidos en secano. El planeamiento del riego es necesario para capitalizar la conservación del agua en años lluviosos y aumentar la aplicación durante los años secos. Farré y Faci (2009) demuestran que a través de esta estrategia es posible mantener rendimientos relativamente altos (9000 - 10000 kg/ha) en comparación con riego full (11000 - 12000 kg/ha).

Ertek y Kara (2013) estudiando el efecto de riego deficitario en maíz dulce encontraron que no había diferencia significativa entre regar a un 85% del total del AD en el perfil del suelo y la CC. Además, observaron que el tratamiento de 70% del total de AD permitía un aumento en proteína y azúcares, resultaba en un ahorro de agua y el rendimiento no disminuía significativamente.

Payero (2006) obtuvo en maíz rendimientos de 88 % en relación a los tratamientos sin déficit hídricos y utilizando un 62 % del agua de riego. En este experimento la estrategia de riego fue de demorar el riego hasta 2 semanas antes del panojamiento o en su defecto hasta permitir un agotamiento del 70 % AD del suelo. La etapa reproductiva se mantuvo en un rango de 40 a 70 % de AD y luego de esta etapa un 30 % de AD.

Klocke et al. (2004) reportaron en Nebraska que utilizar cerca de un 40 % menos de agua de riego en comparación con la práctica de riego completo significó una reducción de tan solo 16 % de rendimiento. El criterio manejado en el riego consistió en no regar hasta dos semanas antes de panojamiento a menos que el agua disponible del suelo alcanzara el 30 % en la etapa vegetativa. Una vez comenzada la etapa reproductiva el umbral es de 50 a 100 % y se mantiene por cinco semanas utilizando como máximo 200 mm aplicados por ciclo.

Ko y Piccinini (2009a) plantean el riego deficitario desde el requerimiento actual del cultivo (ETc) donde demuestran que esta estrategia de riego se traduce en mayores rendimientos junto a una mayor eficiencia en el uso del agua (EUA). En adición, reportan que es factible utilizar un régimen de riego de 75% de ETc con una reducción del 10% del rendimiento de grano.

2.8. EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA

La EUA es la relación entre la cantidad de carbono fijado por unidad de agua consumida con la cantidad evapotranspirada de la misma (Medrano et al., 2007). La EUA varía entre especies, explicado por el tipo de metabolismo, composición de la biomasa, y a las características del uso del agua, condicionado por la demanda atmosférica de cada ambiente (Aloé y Toribio, 2008).

Por otra parte, Aydinsakir et al. (2013) mencionan que la EUA se estima como el rendimiento (kg/ha) dividido el uso del agua (mm) durante la estación de crecimiento del cultivo. Mientras tanto la eficiencia del uso de agua de riego (EUR) se calcula como la proporción entre el rendimiento y la cantidad de agua irrigada (mm) a través del ciclo

del cultivo.

Callero (2014) reportó una EUA de 26 kg/mm cuando la ETc total del cultivo fue 542 mm. Resultados inferiores fueron observados por Ceriani e Inella (2012) quienes encontraron la EUA alrededor de 18 kg de grano/mm evapotranspirado. A su vez Fassio et al. (1998) mencionan que en nuestras condiciones en promedio aproximadamente 20 kg/ha de grano son producidos por cada mm de agua evapotranspirado.

En Argentina estudios llevados a cabo por DellaMaggiora et al. (2000) mencionan un rango entre 10-24 kg de grano/mm de agua consumida. Espósito et al. (2012) en Río Cuarto reportaron una EUA promedio de 22 kg grano/ mm de agua.

Payero et al. (2006) calcularon la EUR como $EUR = [\text{rendimiento regado} - \text{rendimiento en seco}] / [\text{cantidad regada}]$ en los distintos tratamientos estudiados. Encontraron que fue consistentemente mejor la EUR con riego deficitario (22 kg/mm) respecto al riego full (14,9 kg/mm). Dichos autores mencionan que el primer riego obtuvo la mayor eficiencia que los riegos posteriores en los tratamientos de riego deficitario. En nuestro país, Ceriani e Inella (2012) encontraron que la EUR fue aproximadamente 14,5 kg de grano por mm de lámina de agua de riego.

Ko y Piccinini (2009a) en estudios realizados en el sur de Texas encontraron una asociación entre las variables EUA, rendimiento y aporte de agua (mm). La EUA decrece linealmente a partir de determinada cantidad de agua aportada entre lluvia y riego (456mm) (Ko et al., 2009b). La razón de ello es que aportes superiores a lo requerido no incrementan los rendimientos dado que el agua se pierde por evaporación y/o percolación profunda (Geerts y Rae, 2009).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

El ensayo se realizó durante el año agrícola 2014-15 en el campo experimental de riego de la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni” (EEMAC) de la Facultad de Agronomía ubicada sobre la ruta 3, Km. 363 en el Departamento de Paysandú, Uruguay, 32°22' S 58°03' W. El experimento se llevó a cabo sobre un suelo Brunosol sub-éutrico típico perteneciente a la unidad San Manuel, según la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay, incluida dentro de la formación Fray Bentos (Altamirano et al., 1976). Las características físicas e hidrológicas se presentan en el cuadro 1.

Cuadro No. 1. Características físicas e hidrológicas del suelo del campo experimental de la EEMAC

Horizonte	Profundidad (cm)	DAP (gr/cm ³)	CC (mm)	PMP (mm)	CAAD (mm)
A	0-20	1.25	54	28	26
B	20-70	1.34	235	150	85
AB	0-70		289	178	111

DAP: densidad aparente, CC: capacidad de campo, PMP: punto de marchitez permanente, CAAD: capacidad de almacenaje de agua disponible.

3.2. MANEJO EXPERIMENTAL

La siembra se efectuó manualmente el 27 de octubre de 2014 con un posterior raleo el 13 de noviembre del mismo año para obtener una densidad de 100.000 plantas ha^{-1} . Las parcelas estuvieron conformadas por cinco surcos de cinco metros cada uno a una distancia de 0,7 m entre sí. El material genético utilizado fue el híbrido DK 670 de ciclo intermedio; el control de malezas se realizó con la aplicación del herbicida atrazina en pre-emergencia a una dosis de 1 l/ha^{-1} de producto comercial. Se fertilizó a razón de 300 kg/ha^{-1} de N en el estadio V6 utilizando como fuente urea (46-0-0).

3.2.1. Tratamientos

Los tratamientos estudiados fueron cuatro, donde BH es bienestar hídrico, RDC es riego deficitario controlado, PC período crítico y RD riego deficitario.

- T1 BH durante todo el ciclo
- T2 RDC durante la etapa vegetativa y PC
- T3 RDC en el PC hasta fin del llenado de granos
- T4 RD todo el ciclo (50 % de BH)

El T1 fue el tratamiento testigo del experimento el cual tuvo condiciones de bienestar hídrico durante todo el ciclo, esto significa que el porcentaje de agua disponible durante el mismo permitió satisfacer los requerimientos hídricos del cultivo. En cambio en los tratamientos de RDC (T2 y T3) se indujeron déficits hídricos; en el tratamiento de RDC en Veg. y PC se indujo el déficit en la etapa de llenado de granos y en el tratamiento de RDC en PC y Llen. el mismo se indujo en la etapa vegetativa. El fin de inducir los déficit hídricos en las etapas que no conllevan RDC es para estudiar el efecto del mismo en las etapas donde se realiza. El T4 fue el tratamiento de RD el cual no tiene en cuenta las etapas fenológicas del cultivo por lo cual no se indujeron déficits hídricos. Los umbrales hídricos definidos fueron determinados a través de dos tipos de intervenciones: el riego suplementario y la intercepción de las PP en los tratamientos con déficit hídrico mediante la utilización de simuladores de sequía móviles.

3.2.2. Simuladores de sequía

Los simuladores de sequía consistieron de estructuras de acero con dimensiones de 4 m de ancho, 5 m de largo y 2,5 m de altura, cubiertas por una lona impermeable con el objetivo de impedir el ingreso de agua de lluvia de los tratamientos con déficit hídrico (anexo 1). Para evitar el ingreso de agua por escurrimiento las parcelas fueron rodeadas por una ronda construida de tierra con una altura de 0,2 m y a la vez se construyeron desagües para desagotar el agua de lluvia proveniente de los techos de los simuladores.

3.2.3. Riego

El riego se implementó a través de un sistema de goteo con cintas colocadas en cada surco y goteros distanciados entre sí a 0,2 m con un caudal de 1,49 l .h-1. La variación del porcentaje de agua disponible (AD) determinó a través del agotamiento de agua del suelo el inicio del riego, dependiendo de la etapa del cultivo y del tratamiento.

En el tratamiento de BH (T1) y los tratamientos de RDC (T2 y T3), el riego en el PC se inició cuando el porcentaje de AD descendió hasta 60 %; mientras que en los PNC se permitió que el AD descendiera hasta 40 %. El objetivo del riego para ambos casos fue el de alcanzar el 90% de AD.

En el tratamiento de 50 % de BH (T4) el criterio de riego fue en función del tratamiento de BH donde se utilizó el 50 % del agua de riego y no en base a los umbrales mencionados. En aquellos tratamientos y etapas que requerían de déficits hídricos el AD se permitió que disminuyera hasta 20 % para posteriormente regar hasta el 40 % de AD.

Por medio de un balance hídrico de suelos de paso diario simplificado se estimó el contenido de AD del suelo, de la siguiente forma $\Delta S = PP + R - ETc_{aj}$, siendo ΔS la variación del AD (mm), R fue el riego (mm) y ETc_{aj} fue la evapotranspiración del cultivo ajustada (mm). Ésta última también fue calculada diariamente de la siguiente manera $ETc_{aj} = ETo \times Kc \times Ks$, siendo ETo la evapotranspiración del cultivo de referencia (mm), Kc el coeficiente del cultivo y el Ks el coeficiente de estrés hídrico. La misma se estimó utilizando la ecuación de FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) y para los Kc se utilizaron los propuestos por FAO (Allen et al., 1998) para maíz.

El Ks resulta de la siguiente ecuación $Ks = \frac{ADT - Dr}{(1-p) \times ADT}$, donde ADT es el agua disponible total en la zona radicular del suelo (mm), Dr es el agotamiento de la humedad en la zona radicular (mm) y p es la fracción de la ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin sufrir estrés hídrico (Allen et al., 1998). Las variables que determinan los valores de ETo fueron medidos mediante una estación meteorológica automática Vantage Pro 2TM, modelo 6510 (Davis Instrumentals, Hayward, CA)

ubicada en la EEMAC.

3.3. MEDICIONES EFECTUADAS

Se realizó un muestreo de MS, en la cosecha del experimento el 6 de marzo. Se cosecharon 8 metros lineales de plantas dejando un remanente de 5 cm respecto al suelo, en cada parcela. Además, se registraron los siguientes datos: número de plantas, número de espigas por planta, espigas totales y peso fresco total de cada tratamiento.

Posteriormente, en la etapa de laboratorio se seleccionó al azar una planta por cada tratamiento (una sub-muestra) la cual se secó en estufa a una temperatura entre 40 y 60 ° C para obtener el peso seco constante. Este mismo procedimiento se realizó con las chalas y los marlos. A su vez, se determinó el número de granos por hilera, las hileras por espiga, los granos por espiga, se midió la longitud de la espiga, el peso de mil granos (PMG) y el porcentaje de humedad de los mismos.

3.4. DETERMINACIONES ESTADÍSTICAS DEL EXPERIMENTO

3.4.1. Hipótesis biológicas

El riego deficitario controlado permite obtener rendimientos que no difieren significativamente del testigo que conlleva riego en todo su ciclo para el ambiente de producción donde se desarrolla.

3.4.2. Hipótesis estadísticas

Ho: los efectos de los diferentes tratamientos son iguales $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4$

Ha: existe al menos un tratamiento diferente.

3.4.3. Diseño experimental

El trabajo fue diseñado bajo el modelo de un diseño en bloques completamente al azar (DBCA) debido a que: cada bloque tiene tantas unidades experimentales como tratamientos, dentro de cada bloque los tratamientos son asignados a las parcelas en

forma aleatoria y a que cada tratamiento aparece el mismo número de veces en cada bloque. El experimento consistió en 4 tratamientos, cada uno con 3 repeticiones.

El modelo de ANAVA para un diseño en bloques completamente aleatorizados es:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde

Y_{ij} : observación en la unidad experimental i, j .

i = tratamiento: 1, 2, 3, 4.

j = bloque: 1, 2, 3.

μ : media general.

τ_i : efecto del i -ésimo tratamiento.

β_j : efecto del j -ésimo bloque.

ε_{ij} : error experimental de la unidad experimental i, j .

Criterios de decisión sobre la hipótesis:

-Si las diferencias entre las medias muestrales son “suficientemente” grandes se rechaza.

- H_0 . Si el p-valor es $= 0 < \alpha 0,1$ se rechaza H_0

-Si el p-valor es mayor a $\alpha 0,1$ no se rechaza H_0

3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados fueron analizados con el software estadístico “Infostat” versión 2011. A través de este programa se realizó análisis de la varianza se hicieron pruebas de comparación múltiple (según Tukey al 10%) y regresión lineal entre rendimiento y número y PMG.

3.6. CONDICIONES CLIMÁTICAS DURANTE EL EXPERIMENTO

3.6.1. Precipitaciones

En la figura 1 se muestran las PP ocurridas durante el experimento en el año agrícola 2014-2015 junto con los valores medios mensuales en Paysandú de una serie histórica desde 1980-2009 (Castaño et al., 2011).

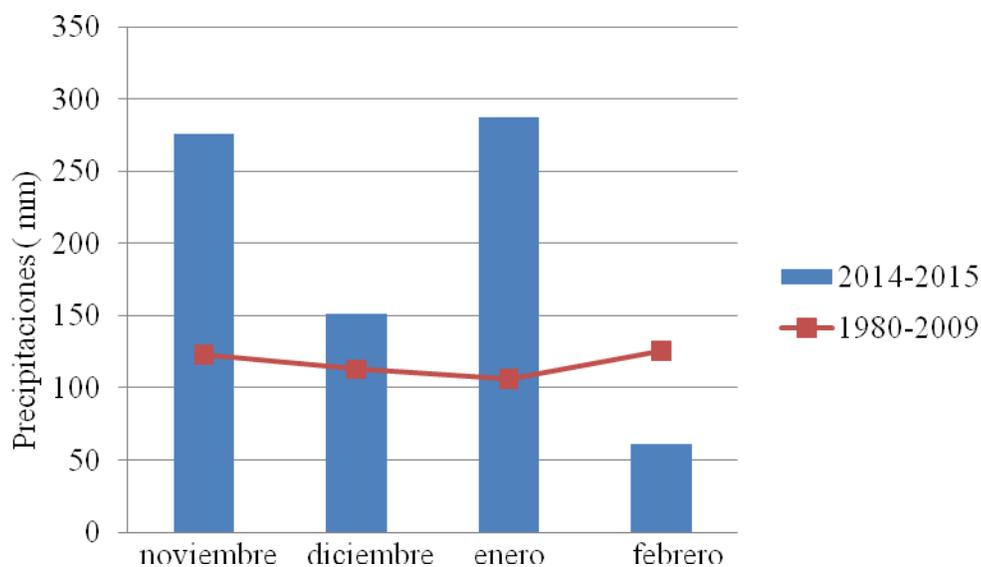


Figura No. 1. Precipitaciones promedio mensuales en Paysandú para la serie histórica 1980-2009, y en la temporada 2014-2015 registrado por la estación meteorológica de la EEMAC (elaborado en base a datos proporcionados por EEMAC).

Para el año en estudio los meses de noviembre diciembre y enero presentaron valores de PP por encima de la serie histórica, donde noviembre y enero estuvieron en un 170 a 250 % superior. Sin embargo en febrero, las PP fueron un 70 % inferior.

El total comprendido desde 27 de octubre hasta el 6 de marzo fue de 713 mm, de los cuales 316 mm se concentraron desde el día 20 de diciembre al 20 de enero, coincidiendo con el momento de máximo requerimiento hídrico (Giménez, 2001).

Debido a estas condiciones del año es esperable que el rendimiento no haya sido limitado por las PP.

3.6.2. Radiación solar

A continuación, en la figura 2, se presenta la radiación solar promedio de la serie histórica comprendida entre los años 2002-2014, y los valores promedio de los meses de estudio en MJ/m²/día.

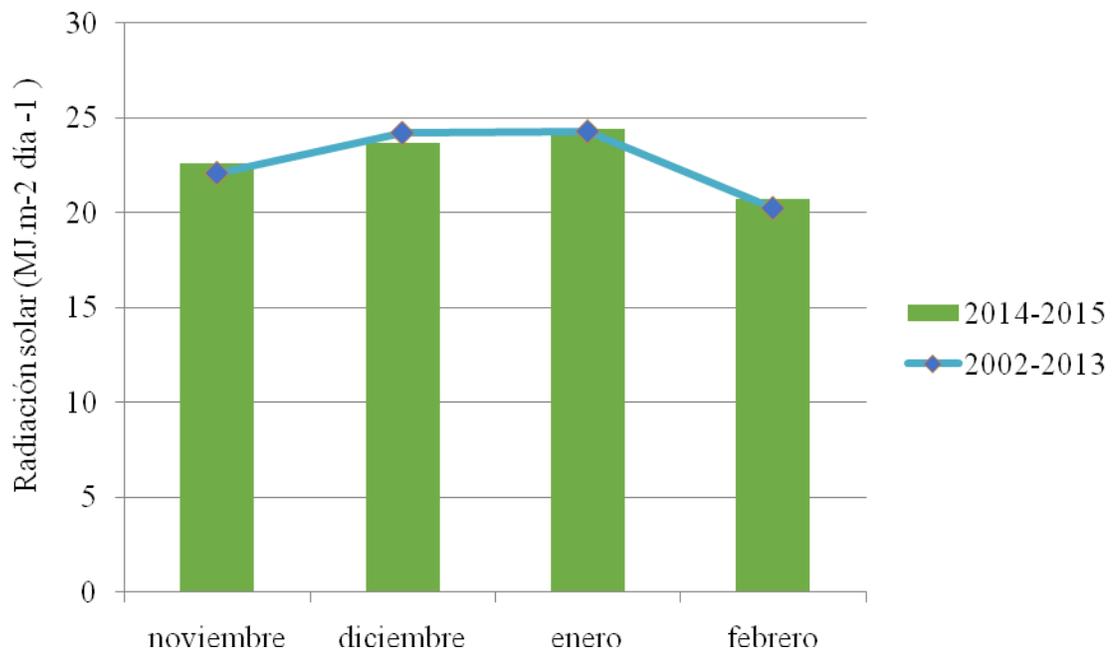


Figura No. 2. Radiación solar promedio (MJ/m²/día) en la EEMAC durante la estación de crecimiento 2014-2015, y para la serie histórica 2002-2013 en Paysandú (estación meteorológica automática de la EEMAC).

De la figura 2 se aprecia que durante noviembre y febrero la radiación solar fue ligeramente mayor a la de la serie histórica. En diciembre la misma se ubicó por debajo mientras que en enero no existieron diferencias. Es válido resaltar que era esperable una menor radiación en enero en relación a la serie histórica como ocurrió en diciembre, debido a que las PP estuvieron por encima de la media generando una mayor nubosidad y por ende menor radiación incidente. Es por ello que para determinar la incidencia de este factor sobre los rendimientos se analizó detalladamente la cantidad de MJ/m²/día

durante el PC y llenado de granos en el año de estudio en comparación con la serie histórica 2002-2013.

En la siguiente figura se presentan los datos del 20 de diciembre al 20 de enero agrupados en octavarios.

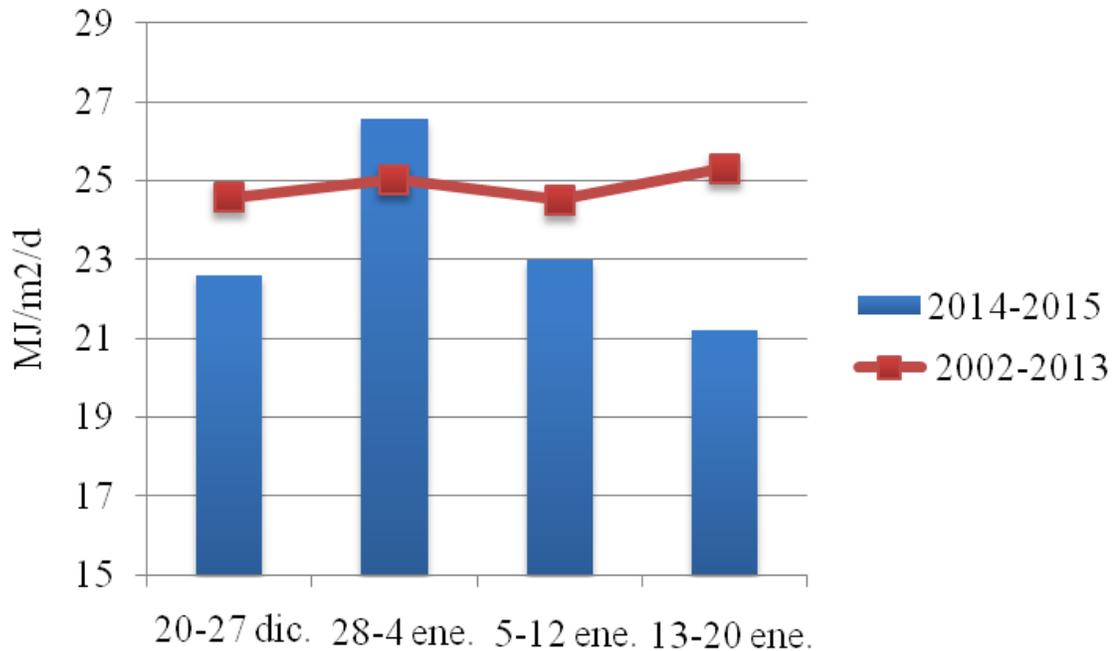


Figura No. 3. Radiación solar promedio (MJ/m²/día) en la EEMAC durante la estación de crecimiento 2014-2015, y para la serie histórica 2002-2013 en Paysandú (estación meteorológica automática de la EEMAC).

En base a lo mencionado anteriormente la figura demuestra que durante el PC el 75 % del mismo tuvo condiciones inferiores de radiación respecto a la media histórica. En los 32 días de este período en el año experimental la cantidad total de radiación solar fue de 747 MJ/m² en comparación con los 795 MJ/m² de la serie.

A continuación, se presenta los datos de radiación solar del 16 de enero al 28 de febrero correspondientes a la etapa llenado de granos agrupados según las fases de la misma estimadas mediante la predicción de estado fenológico INIA. Para visualizar las predicciones fenológicas (anexo 2).

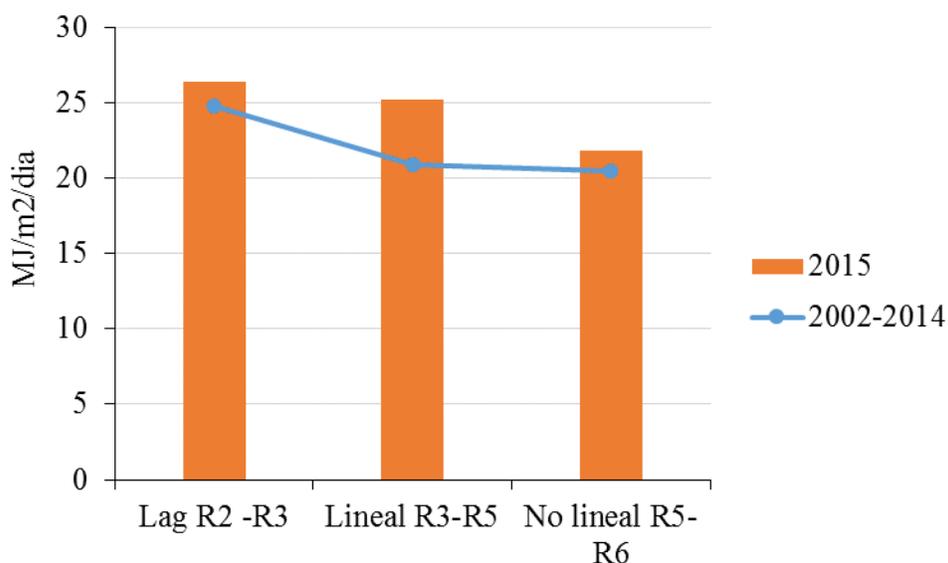


Figura No. 4. Radiación solar promedio (MJ/m²/día) en la EEMAC durante la estación de crecimiento 2014-2015, y para la serie histórica 2002-2014 en Paysandú (estación meteorológica automática de la EEMAC).

En la figura 4 se aprecia que la radiación durante el llenado de granos fue superior a la media histórica. Dentro de la etapa llenado de grano, la fase de crecimiento lineal es el periodo en que ocurre la máxima tasa de llenado (Giménez, 2000). Como se observa dicha fase se ubicó bajo condiciones superiores de radiación respecto a la media, aproximadamente 4 MJ/m²/día. Al comparar la radiación total durante dicha etapa resulta en una diferencia a favor del año en estudio 941 contra 823 MJ/m² de la serie 2002-2014.

3.6.3. Temperatura

En la siguiente figura se presentan los datos de temperatura media del año experimental 2014-2015, junto con los datos de la serie histórica para la localidad de Paysandú desde 1980 a 2009 (Castaño et al., 1976).

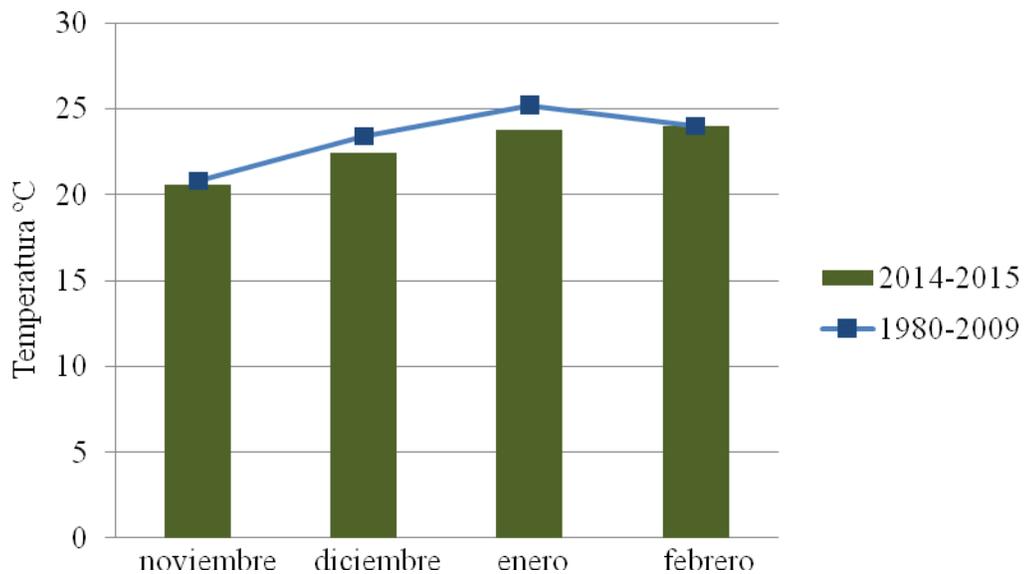
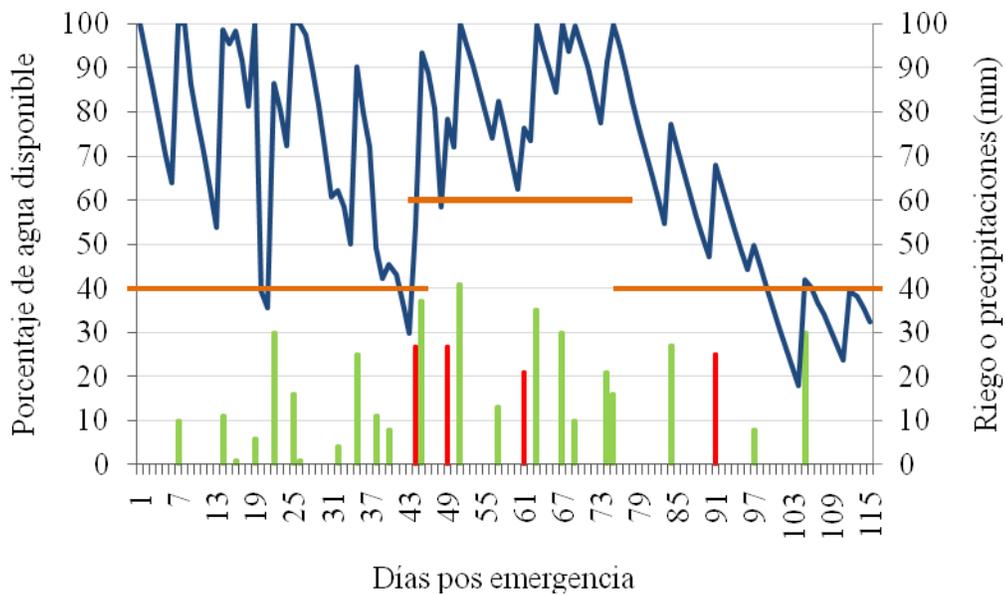


Figura No. 5. Temperatura promedio mensual (°C) en la EEMAC durante la estación de crecimiento, y para la serie histórica comprendida entre 1980-2009 en Paysandú (estación meteorológica automática de la EEMAC).

En el figura 5 se evidencia que las temperaturas durante el ciclo del cultivo estuvieron por debajo respecto a la media histórica durante los meses de diciembre y enero, y fueron similares en los meses de noviembre y febrero. En el ciclo del cultivo no se alcanzaron las temperaturas óptimas para la fotosíntesis de la especie (Bolaños et al., 1993) sin embargo estas se estiman que no fueron limitantes para el crecimiento y desarrollo.

3.6.4. Agua disponible

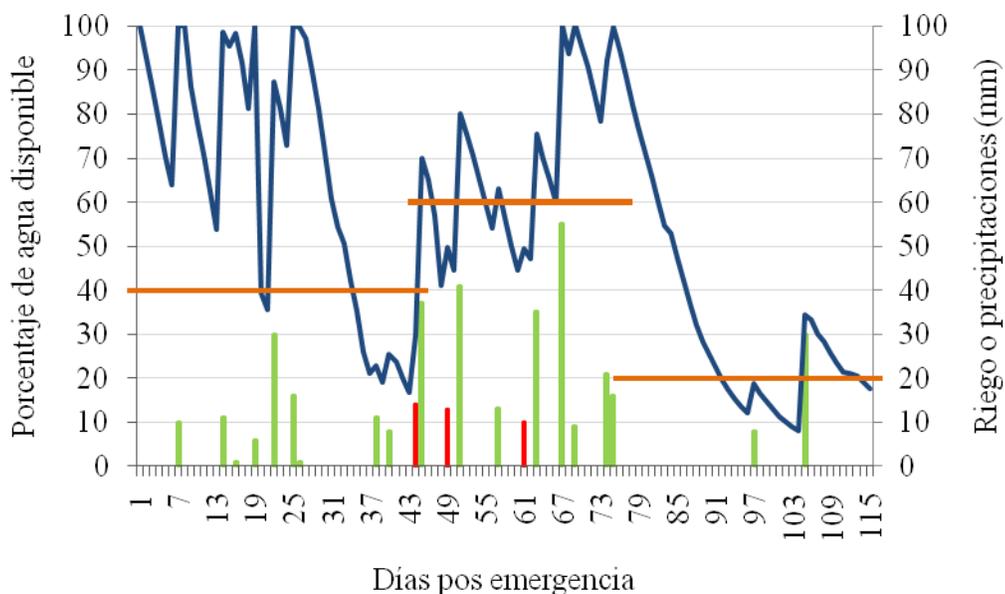
Para cada tratamiento, en las figuras 6, 7, 8 y 9 se presentan la evolución del agua disponible en porcentaje con los umbrales de riego utilizados respectivamente.



La línea naranja indica los umbrales de riego, la línea azul el porcentaje de AD, la línea verde las precipitaciones efectivas (mm) y la línea roja el riego efectivo (mm).

Figura No. 6. Evolución del porcentaje de AD en el tratamiento de bienestar hídrico en todo el ciclo (T1) durante el ciclo del cultivo.

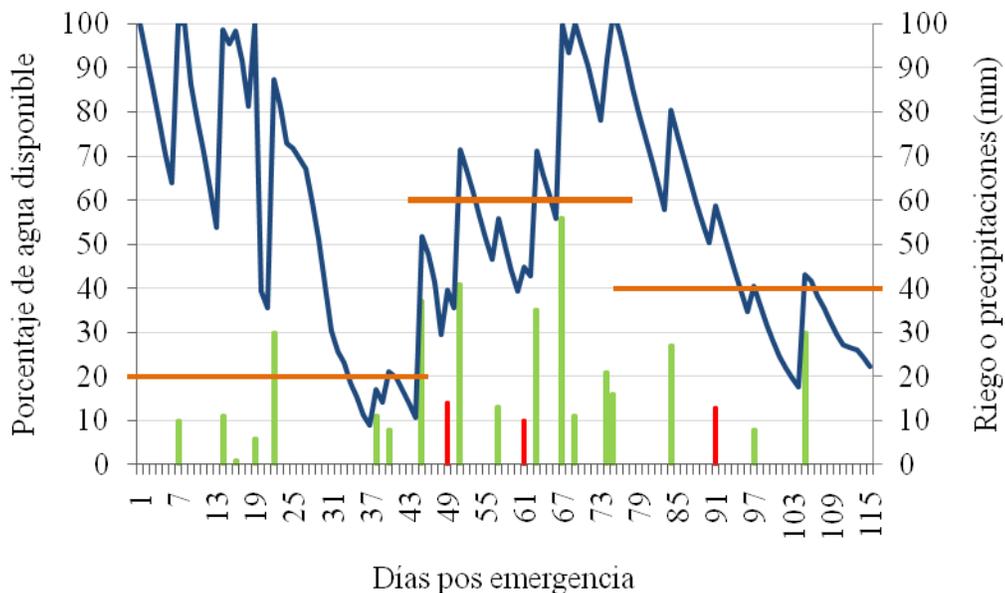
En el tratamiento 1 de BH se intentó mantener en las etapas no críticas el AD del suelo hasta un 40 %, mientras que en la etapa crítica hasta un 60 %. Como se observa en la gráfica a lo largo del ciclo se cumplió con la premisa planteada a excepción del final de la etapa vegetativa y R5-R6. En el llenado de grano la caída del AD se corresponde a que se demoró el riego en base al pronóstico de PP.



La línea naranja indica los umbrales de riego, la línea azul el porcentaje de AD, la línea verde las precipitaciones efectivas (mm) y la línea roja el riego efectivo (mm).

Figura No. 7. Evolución del porcentaje de AD en el tratamiento de riego deficitario controlado en etapa vegetativa y período crítico (T2) durante el ciclo del cultivo.

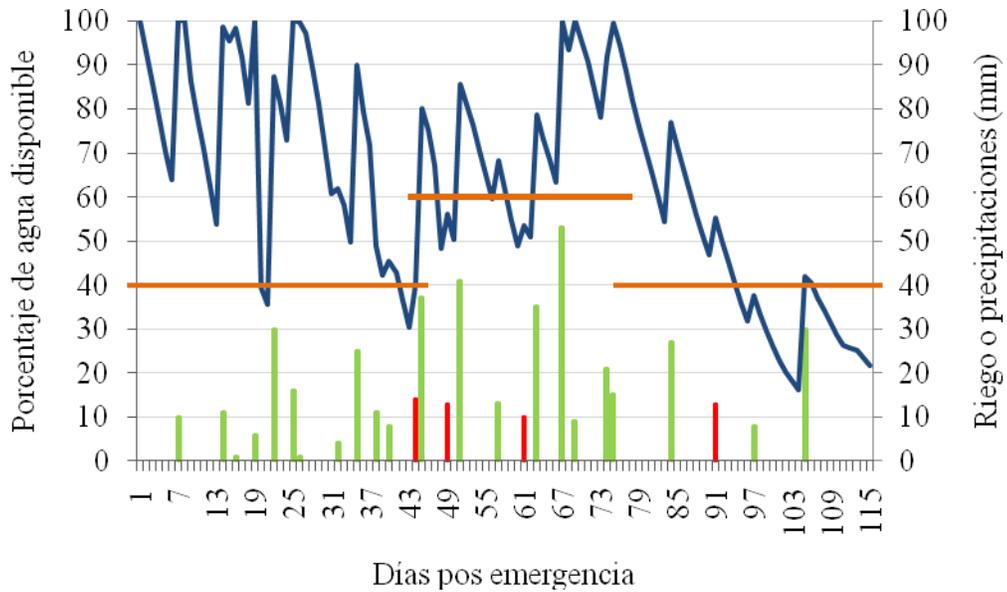
La evolución del AD en esta figura demuestra que durante el ciclo del cultivo en general se cumplieron con los distintos umbrales de riego (UR) en las distintas etapas. Sin embargo hacia el final de la etapa vegetativa (32 y 35 días post emergencia) se interceptaron equívocamente dos eventos de lluvias de 29 mm en total, causante del descenso del AD por debajo del umbral para esta etapa. Desde el final del PC y durante el llenado de granos se concretó el objetivo del UR para dicho tratamiento.



La línea naranja indica los umbrales de riego, la línea azul el porcentaje de AD, la línea verde las precipitaciones efectivas (mm) y la línea roja el riego efectivo (mm).

Figura No. 8. Evolución del porcentaje de AD en el tratamiento riego deficitario controlado en período crítico y llenado de granos (T3) durante el ciclo del cultivo.

Al inicio de la etapa vegetativa no se logró la deficiencia hídrica planteada incumpliendo con el UR de 20%, hacia el final de la misma se interceptaron 119 mm de PP que se corresponden a cuatro eventos. Posteriormente en el PC el porcentaje de AD quedó parcialmente logrado, presentando variaciones entre 40 y 60 % AD durante la mitad de esta etapa, mientras que la otra mitad si se cumplió con la premisa planteada. Durante la etapa llenado de granos, en la fase no lineal, se respetó el UR en cierta medida ya que durante 10 días el no regar provocó una caída inferior al 40% hasta la ocurrencia de PP.



La línea naranja indica los umbrales de riego del tratamiento de bienestar hídrico, la línea azul el porcentaje de AD, la línea verde las precipitaciones efectivas (mm) y la línea roja el riego efectivo (mm).

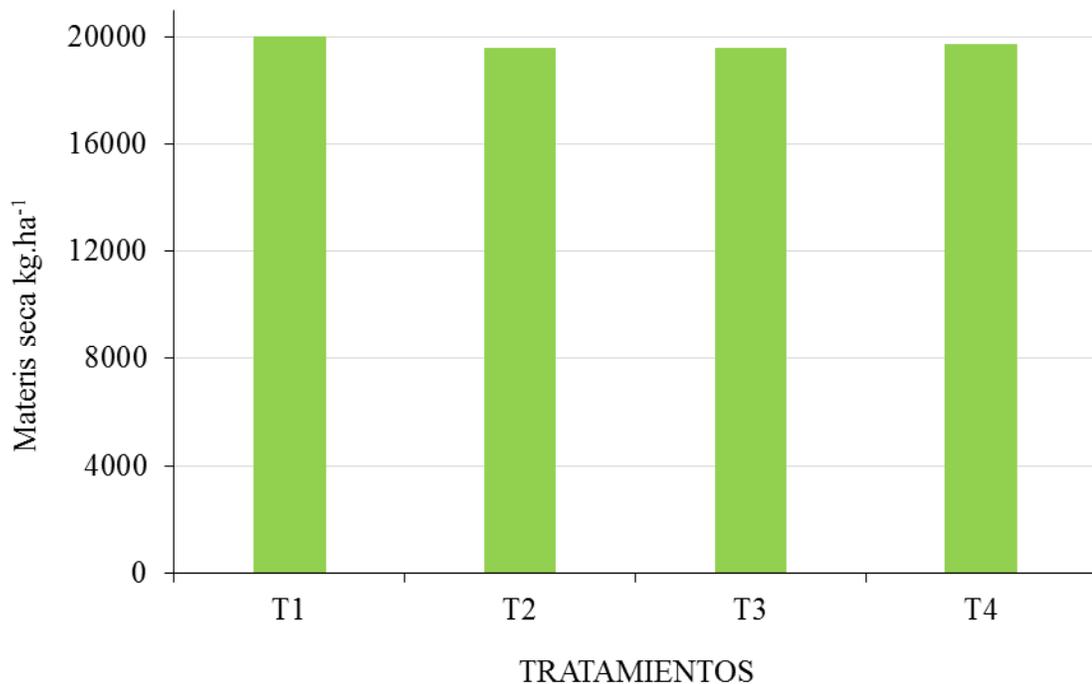
Figura No. 9. Evolución del porcentaje de AD en el tratamiento 50 % de bienestar hídrico (T4) durante el ciclo del cultivo.

En líneas generales durante la estación de crecimiento el porcentaje de AD estuvo por encima de los umbrales del tratamiento de BH debido a las PP principalmente. Sin embargo, como era esperable se aprecian menores porcentajes de AD a lo largo del ciclo con respecto a este tratamiento dado que se regó el 50 % del mismo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. MATERIA SECA TOTAL

En el presente trabajo las condiciones climáticas de la zafra causaron que la radiación solar diaria y temperatura en el PC estuvieran por debajo del promedio histórico, no permitiendo valores máximos de deposición de MS, dado que en este período es cuando el cultivo expresa su máxima TCC (Andrade et al. 1996a, Andrade et al. 2000a, Giménez 2001, Salvagiotti 2009). Al cuantificar esta diferencia en términos de radiación se obtienen valores de 2 y 3 MJ/día/m² menos que los reportados por Carter y Petrella (2013), Callero (2014), Rameau y Van der Dorpel (2016) para el PC.



T1: bienestar hídrico en todo el ciclo, T2: riego deficitario controlado en etapa vegetativa y período crítico, T3: riego deficitario controlado en período crítico y llenado de granos, T4: riego deficitario al 50 % de bienestar hídrico.

Figura No. 10. Materia seca total (kg ha⁻¹) a cosecha de los tratamientos.

De la figura 10 se observa que no se presentan diferencias significativas en la producción de MS al final de ciclo al igual que lo expresado por Roselli y Texeira

(1998), Giménez (2012), Callero (2014). La producción máxima fue de 20034 kg MS/ha en las condiciones de BH, en concordancia por lo expresado por Giménez (2012) para años “Niño”, siendo inferiores a los valores reportados en años “Niña” por Giménez (2012), Callero (2014) los cuales fueron entorno a los 25000 kg MS. La mayor producción de biomasa en años “Niña” se debe a que la misma es directamente proporcional a la radiación solar en ausencia de otras limitantes (Andrade et al., 1996a)

Sin embargo, a diferencia de lo expresado en la bibliografía internacional deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y llenado de grano no resultan en reducciones significativas con respecto al tratamiento testigo. Cakir (2004) reporta que deficiencias hídricas durante la etapa vegetativa reducen entre 28 y 32 % la producción de biomasa a fin de ciclo en comparación con el testigo sin deficiencias y una merma de 23 y 36% cuando el déficit hídrico se da en la etapa de llenado de grano (NeSmith y Ritchie, 1992). En este ensayo el déficit hídrico que se indujo en la etapa vegetativa (RDC en PC y llenado de grano.) y en el llenado de grano (RDC en Veg. y PC) no causaron estas reducciones debido a que las deficiencias durante las etapas mencionadas fueron parciales.

En cuanto al RDC en el PC y Llen. (deficiencias hídricas en la etapa vegetativa) solo en las dos últimas semanas de la etapa vegetativa el AD del suelo estuvo por debajo de 40 %, sin evidenciar una reducción significativa sobre la MS total a final del ciclo. Con respecto al RDC en Veg. y PC (deficiencia en llenado de grano), lo que se obtuvo recae en que el déficit hídrico planteado en la etapa de llenado de granos fue parcial correspondiéndose al 44 % de los días.

4.2. EFECTO DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA SOBRE EL RENDIMIENTO

En el cuadro 2 se muestran los resultados del rendimiento, el análisis estadístico de los distintos tratamientos indicó que no difieren entre sí. Esto indica que no hubo efecto de las deficiencias hídricas planteadas al ser todos los tratamientos iguales en términos de rendimiento.

Cuadro No. 2. Rendimiento en grano (kg/ha) de cada tratamiento evaluado.

Tratamiento	Rendimiento en grano (kg ha-1)
T1	12509
T4	11653
T3	11503
T2	11133

T1: bienestar hídrico en todo el ciclo, T2: riego deficitario controlado en etapa vegetativa y período crítico, T3: riego deficitario controlado en período crítico y llenado de granos, T4: riego deficitario al 50 % de bienestar hídrico.

La máxima producción medida la presenta el tratamiento sin deficiencias hídricas cuyo rendimiento está entorno a los 12500 kg/ha, siendo inferior al potencial de rendimiento reportado por Giménez (2012) para estas condiciones (13,5 t/ha). Al comparar los rendimientos del BH con deficiencias hídricas en llenado de grano (RDC en Veg. y PC), se aprecia una reducción del rendimiento de 11 %. Estas diferencias son menores que las encontradas por NeSmith y Ritchie (1992), Giménez (2014) en las que se reportan una reducción entre 27 y 30 % respectivamente. La menor brecha entre el rendimiento máximo y mínimo medido en este experimento se explica por las condiciones climáticas del año que limitaron el máximo rendimiento del testigo en tanto que el menor rendimiento registrado fue superior al obtenido por Giménez (2014).

Por otro lado, cuando se analiza el BH contra el tratamiento de deficiencia en la etapa vegetativa (RDC en PC y Llen.) se evidencia una reducción aproximada de 1 t/ha. Esta leve diferencia del 8 % concuerda con lo mencionado por Andrade et al. (2000a), Cakir (2004), Giménez (2012) quienes manifiestan que deficiencias hídricas durante la etapa vegetativa es la menos influyente en el rendimiento; ya que la misma no se determinan los componentes del rendimiento (Cakir, 2004). Finalmente la diferencia entre BH y el 50 % del mismo (T4) resultó en una merma del rendimiento entorno al 7 %. Este último evapotranspiró 22 mm menos durante el ciclo y produjo

aproximadamente 300 kg MS/ha menos que el BH, resultado que se traduce en un menor rendimiento aunque estadísticamente iguales.

La inexistencia de diferencias significativas entre los tratamientos es producto de que las deficiencias hídricas que fueron inducidas no fueron de gran magnitud. Es por ello que las diferencias numéricas y la tendencia a obtener menos rendimiento en los tratamientos de RDC se pueden explicar a partir del agua efectiva de cada tratamiento junto a la localización de estas diferencias. En el cuadro 3 se presentan los datos de agua efectiva por etapas y tratamientos, para la misma se consideran las PP efectivas junto con el agua de riego efectivo.

Cuadro No. 3. Agua efectiva total por etapas y tratamiento (mm).

ETAPAS	BH	RDC en Veg. y PC	RDC en PC y Llen.	50% de BH
Vegetativa	150	108	77	137
Período crítico	251	250	253	247
Llen. de grano	90	38	78	78
Total	491	396	408	462

BH: bienestar hídrico en todo el ciclo, RDC en Veg. y PC: riego deficitario controlado en etapa vegetativa y período crítico, RDC en PC y Llen.: riego deficitario controlado en período crítico y llenado de granos, 50 % de BH: riego deficitario al 50 % de bienestar hídrico.

Al comparar el RDC en Veg. y PC contra el BH en el cuadro 3 se aprecia que el primero tuvo 95 mm menos de agua efectiva durante el ciclo, ubicados en la etapa vegetativa y el llenado de granos siendo 28 y 58 % menos respectivamente. La merma en rendimiento es aproximada a los 1400 kg causados por estas diferencias en mm de agua efectiva donde el componente peso de grano resultó más afectado que el número de grano.

Asimismo, se observa que al analizar el RDC en PC y Llen. con el BH hay una diferencia en detrimento del RDC en PC y Llen. de 83 mm de agua efectiva durante el ciclo. Aunque ésta menor cantidad de agua es similar a la diferencia mencionada anteriormente, la importancia radica en la localización de las deficiencias. Durante la etapa vegetativa hubo una disminución del 48 % y en el llenado de grano del 13 % de agua efectiva. Como resultado se registró una reducción de 1000 kg en rendimiento siendo el número de grano el componente más afectado. Por su parte el tratamiento de 50 % de BH presentó la misma reducción en porcentaje de agua efectiva que este último tratamiento durante el llenado de grano. Sin embargo, durante la etapa vegetativa la

diferencia con respecto al BH fue de solo 8 % dejando en manifiesto la mayor importancia de las deficiencias durante el llenado ya que la merma del rendimiento fue de 900 kg.

4.2.1. Efecto de la disponibilidad hídrica sobre los componentes del rendimiento

En el siguiente cuadro se muestran los componentes numéricos del rendimiento registrados en el presente ensayo.

Cuadro No. 4. Número de granos por metro cuadrado (No. granos/m²) y peso de mil granos (PMG) promedio para los diferentes tratamientos evaluados.

Tratamientos	No.granos/m ²	PMG (gramos) (*)
T1	4069	304 AB
T2	3935	285 B
T4	3811	306 AB
T3	3649	316 A

(*) Valores con letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p > 0,10$).

T1: bienestar hídrico en todo el ciclo, T2: riego deficitario controlado en etapa vegetativa y período crítico, T3: riego deficitario controlado en período crítico y llenado de granos, T4: riego deficitario al 50 % de bienestar hídrico.

En el cuadro 4 se aprecia que los déficit hídricos inducidos, no tuvieron efecto en el componente de NG por superficie siendo estadísticamente iguales al BH. La no existencia de diferencias significativas en el NG por metro cuadrado se debe a que ninguno de los tratamientos tuvo como objetivo inducir déficit hídricos en el PC, ya que ha sido ampliamente demostrado tanto nacional (Giménez 2010, Giménez 2012, Callero 2014) como internacionalmente (Otegui 1992, Andrade 1995, Andrade et al. 1996a, Andrade y Sadras 2000b, Suero et al. 2000, Cirilo et al. 2015) el impacto en el rendimiento durante esta etapa.

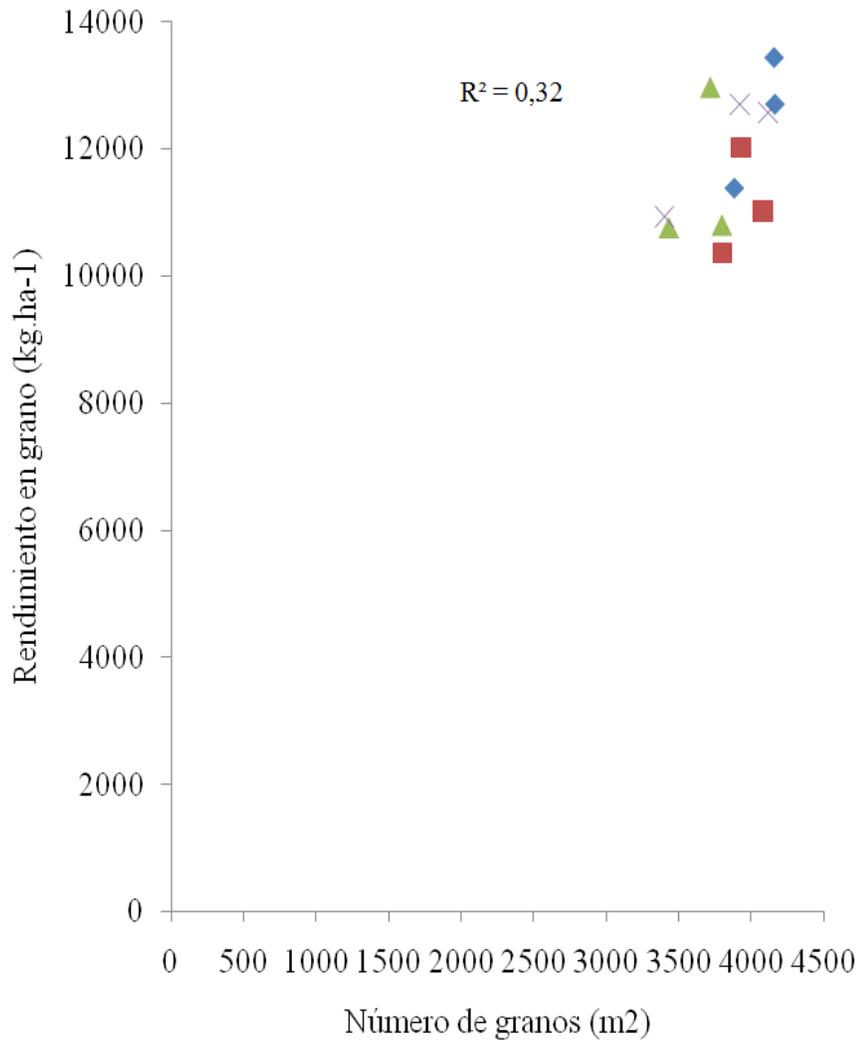
Con respecto al PMG si se aprecian diferencias, el RDC en PC y Llen. obtuvo mayor PMG que el RDC en Veg. y PC esto se explica por dos factores. El primero se debe a que fue el tratamiento con el menor NG y compensó con el peso y el segundo a que el RDC en Veg. y PC tuvo 40 mm menos de agua efectiva durante el llenado de granos que el otro tratamiento de RDC.

La producción máxima de NG por metro cuadrado en este año estuvo por debajo de su potencial (4500-6000 granos/m² Giménez, 2014) lo cual deja en evidencia que la limitante en estas condiciones debió ser la TCC durante el PC, no obstante la misma no fue cuantificada. La compensación del bajo NG por un aumento en su peso no permite obtener los rendimientos potenciales (Andrade y Ferreiro 1996b, Sadras et al. 2000). Esto se evidencia en el RDC en PC y Llen., en el cual la compensación de mayor peso de grano debido a un menor número de los mismos no provocó un mayor rendimiento que el BH siendo inclusive de una tonelada menor.

En este experimento se registró que el PMG para este cultivar estuvo por debajo de su potencial (370 g) a pesar de tener condiciones favorables en términos de radiación durante la fase lineal del llenado de grano y temperaturas inferiores en comparación a la serie 2002-2014 que posiblemente extendiera dicha etapa. Las deficiencias hídricas en el llenado de grano (RDC en Veg. y PC) causaron una reducción en el PMG, congruente esta respuesta con lo expresado por NeSmith y Ritchie (1992), Suero et al. (2000), Giménez (2010). Sin embargo, la magnitud de esta reducción cuantificada en 10 % fue menor que la mencionada por Suero et al. (2000), Giménez (2010) que fueron de 26 y 24 %, respectivamente. En consecuencia, estos autores obtuvieron una disminución del rendimiento entre el 29 y 31 % mientras que en nuestro ensayo fue solo de 11 %.

4.3. RELACIÓN ENTRE RENDIMIENTO Y COMPONENTES DEL RENDIMIENTO

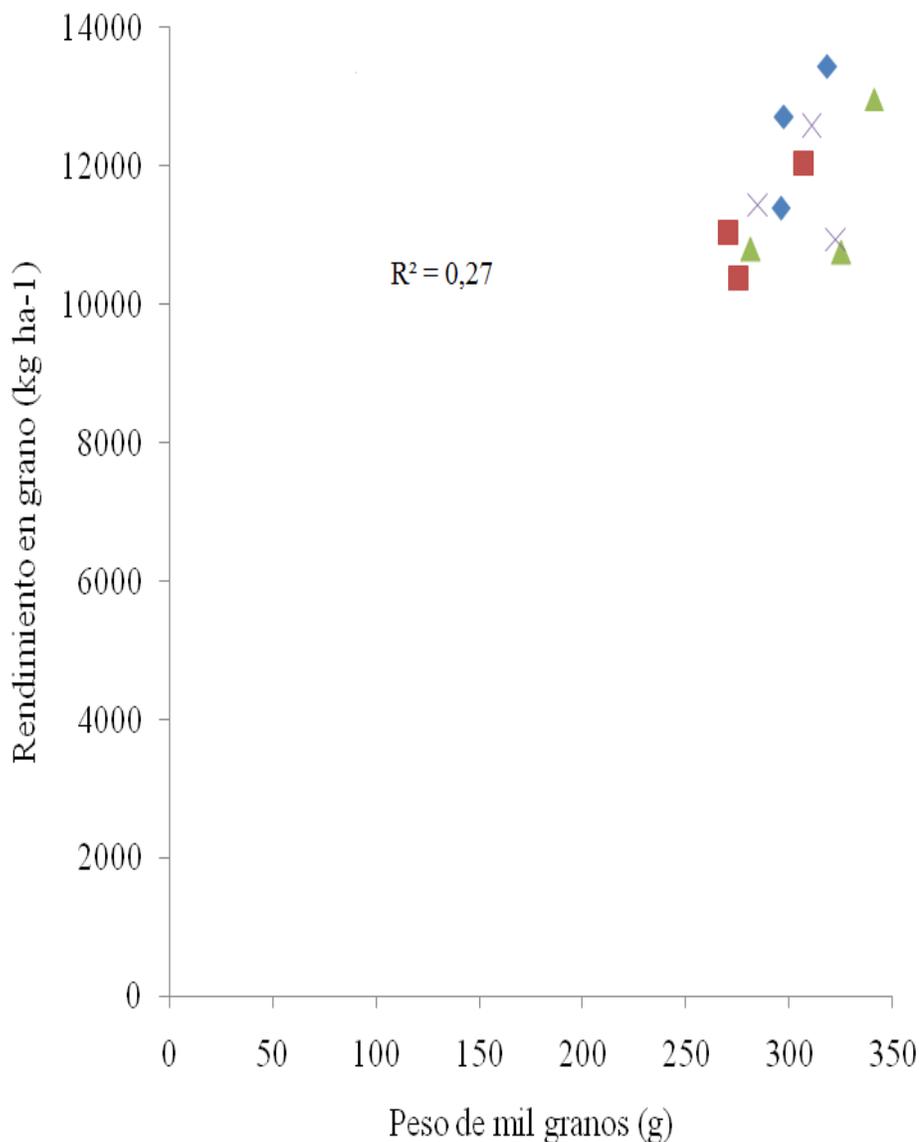
En las figuras 11 y 12 se presentan las relaciones entre el rendimiento y sus componentes discriminados según cada tratamiento.



T1 bienestar hídrico en todo el ciclo (◆), T2 riego deficitario controlado en vegetativo y período crítico (■), T3 riego deficitario controlado en periodo crítico y llenado de granos (▲), T4 riego deficitario al 50 % de bienestar hídrico (×).

Figura No. 11. Relación entre el rendimiento en grano (kg ha⁻¹) y el número de (granos m²) según cada tratamiento evaluado.

Esta ampliamente comprobado que el NG es el componente principal del rendimiento (Otegui 1992, Andrade 1995, Otegui et al. 1995, Stone et al. 2001, O'Neill 2004, Giménez 2012) a pesar de ello, en la figura anterior se visualiza que este componente se ajusta pobremente al mismo con un $R^2=0,32$. La relación que se observa en el presente trabajo dista de los datos reportados por Ceriani e Inella (2012), Carter y Petrella (2013), Callero (2014), Rameau y Van den Dorpel (2016). Donde el NG en los respectivos ensayos explica en mayor medida el rendimiento al tener coeficientes de determinación que varían desde 0,76 a 0,95. En este ensayo el bajo coeficiente de determinación era esperable dado a que no existieron diferencias significativas en los rendimientos entre los tratamientos, sin embargo de la figura se aprecia el BH presenta los datos más agrupados y con rendimientos superiores a los 12000 kg/ha en promedio.



T1 bienestar hídrico en todo el ciclo (◆), T2 riego deficitario controlado en vegetativo y período crítico (■), T3 riego deficitario controlado en período crítico y llenado de granos (▲), T4 riego deficitario al 50 % de bienestar hídrico (×).

Figura No. 12. Relación entre el peso de mil granos y el rendimiento en grano (kg. ha-1) según cada tratamiento evaluado.

Andrade (1995), Giménez (2014), indican que el peso de grano es un componente residual y no determinante del rendimiento al igual que se muestra en la

figura 12, donde este ajuste no permite explicar el rendimiento por medio de dicho componente.

4.3.1. Granos por espiga y espiga por planta

En el cuadro 5 se detallan algunos de los subcomponentes numéricos del rendimiento y se observa que los distintos déficit hídrico inducidos no tuvieron efecto sobre el número de espigas por superficie ni el número de granos por espiga coincidente con lo reportado por Callero (2014).

Cuadro No. 5. Número de espigas por metro cuadrado, número de granos por espiga y número de espigas por planta en los diferentes tratamientos evaluados.

Tratamiento	Número de espigas/m ²	Número de granos/espiga	Número de espiga/planta (*)
T1	10	422	1,04 A
T2	10	418	0,98 A B
T4	10	405	0,96 B
T3	10	391	0,94 B

(*) Valores con letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p > 0,10$).

T1: bienestar hídrico en todo el ciclo, T2: riego deficitario controlado en etapa vegetativa y período crítico, T3: riego deficitario controlado en período crítico y llenado de granos, T4: riego deficitario al 50 % de bienestar hídrico.

En cuanto al NG por espiga, el máximo corresponde al tratamiento con BH a pesar de no presentar diferencias significativas con los demás tratamientos, donde el menor lo presenta el RDC en PC y Llen.. Esta diferencia entre ambos tratamientos del 8 % podría atribuirse a la falta de agua efectiva entorno a las últimas dos semanas de la etapa vegetativa.

Además, en el cuadro 5 se observa que existió esterilidad en las plantas. Esto se evidencia en los tratamientos donde el NEP es menor a uno. El tratamiento con BH fue el mejor tratamiento y se diferenció estadísticamente del RDC en PC y Llen. y 50 % de BH, a pesar de no diferir con el RDC en Veg. y PC. Sin embargo, el BH también presentó plantas estériles al momento de la cosecha, pero el NEP fue superior a los demás tratamientos debido a la presencia de una segunda espiga en algunas plantas, no

obstante, estas se caracterizaron por tener en promedio menos de 150 granos por espiga.

La prolificidad de un cultivar es función de las TCP durante el PC (Andrade et al., 1999) y del material genético (Andrade, 2000). Por lo cual se asume que la TCP es lo que podría estar explicando las diferencias mencionadas en el NEP. De tal manera estimamos que el BH obtuvo las mejores TCP durante el PC en comparación con los demás tratamientos; sin embargo para la población utilizada cabría esperar ausencia de esterilidad en el BH y 50% de BH, por mejores condiciones hídricas con respecto al RDC. A pesar de ello, la radiación durante el PC probablemente haya limitado la TCP y por tanto el NEP.

4.3.2. Número de hileras por espiga y granos por hilera

En el siguiente cuadro se muestra la caracterización de las espigas por tratamientos registrados en el presente trabajo.

Cuadro No. 6. Número de hileras por espiga y número de granos por hilera de los diferentes tratamientos evaluados.

Tratamiento	Número de hileras/espiga	Número de granos/hilera (*)
T1	14	29 A
T2	14	28 AB
T4	14	28 AB
T3	14	26 C

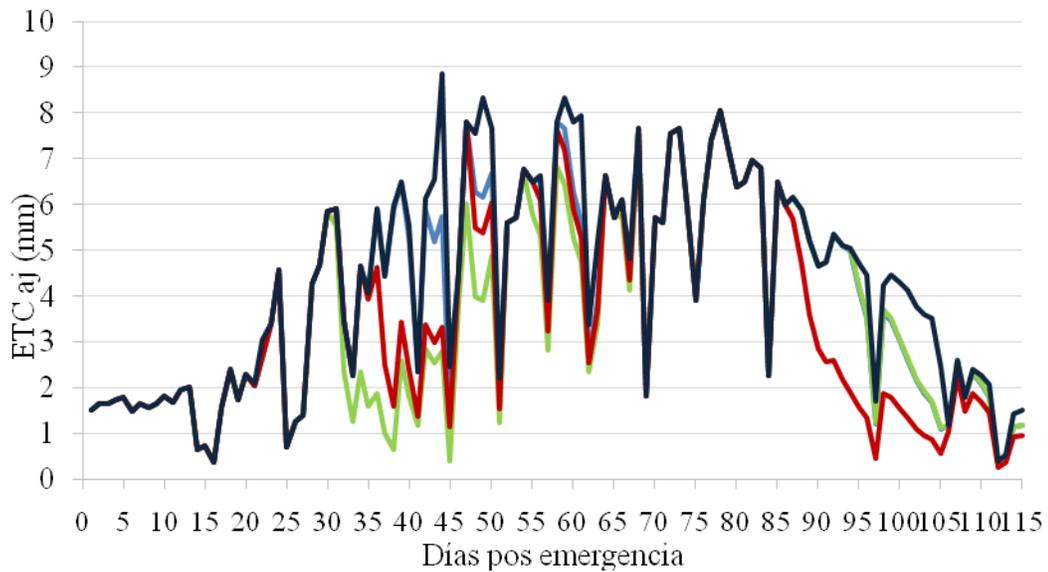
(*) Valores con letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p > 0,10$).

T1: bienestar hídrico en todo el ciclo, T2: riego deficitario controlado en etapa vegetativa y período crítico, T3: riego deficitario controlado en período crítico y llenado de granos, T4: riego deficitario al 50 % de bienestar hídrico.

En el cuadro 6 se observa que el número de hileras por espigas se mantuvo constante entre los diferentes tratamientos siendo este comportamiento predecible por ser una característica fijada principalmente por el material genético. Al apreciar el número de granos por hilera (NGH) hay diferencias significativas entre los tratamientos donde el mayor NGH se corresponde a BH y el menor al RDC en PC y Llen.. Este sub componente es determinado al final de la etapa vegetativa (Fassio et al., 1998) por tanto el déficit hídrico inducido en el RDC en PC y Llen. causó esta reducción. Sin embargo, el NGH potencial para el DK 670 es de 42 y en este ensayo el BH fue un 30 % menor indicando que esta variable es afectada en mayor medida por el ambiente que el sub componente número de hileras por espiga.

4.4. EVAPOTRANSPIRACIÓN Y EFICIENCIA DE USO DEL AGUA

A continuación, se presenta la figura 13 donde se muestra la evolución de la ETc_{aj} diaria de todos los tratamientos para el año en estudio.



La línea azul oscuro es el tratamiento bienestar hídrico en todo el ciclo, la línea roja es el tratamiento de riego deficitario controlado en vegetativo y período crítico, la línea verde es el tratamiento de riego deficitario controlado en período crítico y llenado de grano y la línea celeste es riego deficitario al 50 % de bienestar hídrico.

Figura No. 13. Evolución de la evapotranspiración de cultivo diaria de todos los tratamientos.

En la figura anterior se aprecia que la ETc_{aj} aumentó a partir de los 28 días post emergencia que se corresponde al inicio de diciembre, hasta los 87 días post emergencia que se ubicó al finalizar enero, debido a que éstos son los meses de mayor radiación solar. La alta variación se corresponde a días nublados o con PP los cuales explican las caídas abruptas de un día al otro.

El tratamiento con BH fue el que mayor evapotranspiración registró con 491 mm y un promedio diario para el ciclo de 4,3 mm, además se observa que en ningún momento existe otro tratamiento que evapotranspire más. Del total evapotranspirado aproximadamente el 39 % se produjo durante los 32 días que duró el PC, coincidente con lo mencionado por Zhang (2003) con un promedio diario para dicha etapa de 6 mm en concordancia con los valores reportados por Cardellino y Baethgen (2000). Para años catalogados como “Niño” Giménez (2011) menciona que la evapotranspiración (ETc) en los cultivos de verano es menor respecto a años “Niña” debido a una mayor nubosidad. En la misma localidad, Callero (2014) reportó valores mayores de ETc, 542 mm durante la estación de crecimiento en un año catalogado como “Niña” y no ajustado con los coeficientes de estrés hídrico del suelo.

Mientras tanto el menor valor observado de evapotranspiración en este ensayo lo presentó el RDC en Veg. y PC, con un total de 397 mm y un promedio diario de 3,5 mm. El mismo evapotranspiró 19 % menos durante el ciclo que el tratamiento con BH en donde las deficiencias hídricas inducidas durante el llenado de grano determinaron una reducción del 29 % de la evapotranspiración en dicha etapa. Esto se aprecia en la figura anterior a partir del 85 días post emergencia donde la ETc aj (mm) es siempre inferior o igual a los demás tratamientos hasta la madurez fisiológica del cultivo. En la etapa vegetativa en los últimos días por error, se interceptaron dos eventos de PP que implicaron 42 mm menos de agua efectiva respecto al BH, impactando en una reducción entorno al 20 % sobre los mm evapotranspirados.

Por su parte el RDC en PC y Llen. registró durante la estación de crecimiento similar evapotranspiración al RDC en Veg. y PC siendo de 403 mm para el ciclo. Sin embargo, al disponer de un 48 % menos de agua efectiva durante la etapa vegetativa respecto al BH, provocó una menor evapotranspiración para dicha etapa (31 %). Es por ello, que a partir de los 30 días post emergencia se comienza a observar en la figura 13 una leve disminución de la ETc aj para dicho tratamiento registrando posteriormente los menores valores del ensayo para la etapa. Asimismo, durante el PC se visualiza que los menores valores en esta etapa corresponden al tratamiento en cuestión registrando una disminución cercana al 17 % respecto al testigo. Durante la etapa llenado de granos la ETc aj fue de 150 mm siendo igual a la del tratamiento 50 % de BH lo que representa un 8,4 % menos que el tratamiento de BH.

Aunque RDC en PC y Llen. y el tratamiento 50 % BH en la etapa antes mencionada no tuvieron diferencias en evapotranspiración, éstas si existieron en las otras etapas y por ende en el total acumulado. Este último tratamiento evapotranspiró un 93 % respecto al tratamiento con BH y un promedio diario similar. Las reducciones en mm durante la etapa vegetativa y PC registradas están en el entorno de 4 a 7 % respectivamente. En el anexo 3 se presenta la ETc aj de cada tratamiento junto a la etapa del ciclo y el promedio diario para cada etapa.

4.4.1. Eficiencia de uso del agua

El riego es una tecnología que implica un alto costo de implementación y funcionamiento (Salinas, 2010). Es por ello que requiere de información que permita establecer cuanto rendimiento es posible obtener con los recursos utilizados; implementando la estrategia de riego más eficiente en cada situación (Giménez, 2012) y evitando pérdidas por percolación profunda y/o evaporación al realizar aportes superiores a los requerimientos que no se traducen en mayor rendimiento (Geerts y Rae, 2009).

En el experimento la EUA observada para el BH fue de 25,5 kg/mm donde la ETc aj del ciclo fue de 491 mm, valores similares fueron reportados por Callero (2014), mientras que Ceriani e Inella (2012) indican 18 kg/mm evapotranspirado, sin embargo cabe señalar que estos dos experimentos no ajustaron la ETc. En la región Puiatti et al. (s.f.), Rivetti (2006), Della Maggiora et al. (2008), Éspósito et al. (2012) encontraron resultados similares en términos de eficiencia mientras que Pedrol et al. (2008), Payero et al. (2008) indican valores inferiores en localidades donde la ETc aj supera en más de 150 mm al de este ensayo. Tanto el tratamiento de BH como el 50 % del mismo tuvieron durante todo el ciclo cuatro eventos de riego que se correspondieron con 100 y 50 mm de agua efectiva respectivamente; mientras que el RDC en Veg. y PC y RDC en PC y Llen. fueron objeto de tres eventos de riego para disponer de 37 y 36 mm de agua efectiva cada uno.

Por consiguiente, la EUA de los tratamientos de RDC al compararse con el BH fue mayor producto de un menor consumo de agua y rendimientos similares siendo de 28 kg/mm aproximadamente para el RDC en Veg. y PC y RDC en PC y Llen. En cuanto al tratamiento de 50 % de BH la EUA fue igual BH (25 kg/mm).

Aloe y Toribio (2008), Della Maggiora et al. (2008) expresan que la EUA es una característica variable, que está supeditada a las características del ambiente donde se desarrolla el cultivo debido a la influencia del mismo sobre la ETc. Es por esto que es posible explicar las diferencias con los demás trabajos aquí enunciados.

Para el presente trabajo no es posible calcular la EUR, ya que para ello es necesario tener un tratamiento que no involucre el uso de riego (“secano”) el cual en este experimento no fue evaluado. Este tratamiento no fue utilizado debido a la alta variabilidad de las PP durante la estación de crecimiento en el país, que causan que el parámetro EUR no sea estable entre años. En cambio, la EUA es un parámetro de mayor

estabilidad producto de que la ETc varía en menor medida que las PP entre años.

5. CONCLUSIONES

El RD y RDC durante todo el ciclo permitieron la obtención de rendimientos potenciales; estos últimos utilizando un tercio del agua de riego y evapotranspirando un 19 % menos respecto al testigo regado durante todo el ciclo. El RDC en el PC y Llen. obtuvo una tendencia a mayor rendimiento en comparación con el RDC en Veg. y PC a pesar de una propensión a la reducción en el NG cuando se limita el AD en las últimas dos semanas previas al PC.

El tratamiento de 50 % de BH tuvo una ETc aj entre un 12 y 15 % superior a los tratamientos de RDC no obstante esto no tuvo efecto significativo en el rendimiento causando que la EUA fuera de 25 kg/mm al igual que el tratamiento testigo.

Las deficiencias hídricas al final de la etapa vegetativa o en la fase lineal de llenado de grano no implicaron reducciones significativas en la MS total del cultivo al final del ciclo. Las reducciones de radiación solar durante el PC entorno a 3 MJ/m²/día limitaron la producción potencial del cultivo.

Producto de los resultados obtenidos mediante las distintas estrategias de riego es oportuno repetir el experimento para poder determinar con mayor exactitud si las diferencias numéricas que se observaron son relevantes o son consecuencia de que la TCC durante el PC fue limitada por condiciones ambientales.

6. RESUMEN

Durante el verano 2014-2015 se llevó a cabo en la Estación Experimental “Dr. Mario Alberto Cassinoni” ubicada en la ciudad de Paysandú, Uruguay, un experimento en el cual se evaluó el efecto del riego deficitario controlado (RDC) durante todo el ciclo y en distintas etapas fenológicas del cultivo de maíz. El ensayo consistió en cuantificar rendimiento, componentes de rendimiento y materia seca (MS) a final de ciclo de cuatro tratamientos. El tratamiento testigo se basó en bienestar hídrico (T1), dos tratamientos con RDC, uno localizando el RDC en la etapa vegetativa y período crítico (T2), el siguiente en período crítico y llenado de granos (T3) y el cuarto tratamiento riego deficitario en todo el ciclo que correspondió al 50 % del riego aplicado al bienestar hídrico. Las deficiencias hídricas inducidas se llevaron a cabo mediante simuladores de sequías móviles, mientras que el riego fue aplicado por goteo. El diseño experimental utilizado fue un diseño en bloques completamente al azar (DBCA), donde los cuatro tratamientos tuvieron tres repeticiones cada uno. Los análisis de varianza y regresiones lineales fueron realizados mediante el programa estadístico INFOSTAT 2011. La deposición de MS a fin de ciclo no mostró diferencias significativas, el tratamiento bienestar hídrico registró el máximo valor entorno a 20034 kg de MS. Debido a que las deficiencias hídricas inducidas fueron parciales en los tratamientos de RDC tanto en la etapa vegetativa (T3) como en el llenado de granos (T2), las reducciones mencionadas en la bibliografía nacional e internacional no fueron constatadas en el presente trabajo. Asimismo, en cuanto al rendimiento, tampoco se presentaron diferencias significativas. El tratamiento bienestar hídrico registró el máximo valor, 12500 kg.ha⁻¹. Las deficiencias hídricas inducidas en el T2 determinaron una reducción del 58 % de agua efectiva en la etapa llenado de granos, un 29 % menos de evapotranspiración en la misma que implicó una merma del rendimiento cercano al 11 %, siendo el PMG el componente más afectado. Mientras tanto, en el T3 las deficiencias en la etapa vegetativa provocaron una disminución del 48 % del agua efectiva, por lo que el cultivo evapotranspiró 31 % menos en dicha etapa. En consecuencia, se observaron disminuciones de rendimiento entorno al 8 % impactando en el componente número de granos. Por su parte, regar al 50 % del bienestar hídrico registró un 7 % menos de evapotranspiración lo que conlleva a una merma del 8 % en la producción de granos. La relación entre el rendimiento y sus componentes, tanto NG como PMG no se ajustaron en el presente experimento.

Palabras clave: *Zea mays*; Deficiencia hídrica; Riego.

7. SUMMARY

It was developed during the summer 2014-2015, an experiment at the Experimental Station “Dr M. A. Cassinoni” located in Paysandú, Uruguay which evaluated the effect of regulated deficit irrigation (RDI) in maize during the whole cycle and in different phenological stages. The job consisted in quantifying yield, performance components and dry matter (DM) at the end of the cycle for four treatments. The control treatment was based in well watered crop (T1), two treatments were of RDI, one of them located the RDI at the vegetative and critical period (T2), the other at critical period and grain filling stage (T3) and the fourth was deficit irrigation in the whole cycle which corresponds with 50 % of well watered crop. Induced water deficiencies took place under mobile drought simulators, meanwhile the irrigation was by dripping. The experimental design used consisted of completed blocks at random, with three replications and four treatments. The analysis of variance and linear regression were performed by the statistical program INFOSTAT 2011. DM deposition at the end of the cycle did not show statistical differences; while T1 recorded the maximum value around 20034 kg of DM. Due to the fact that induced water deficits were partial in the RDI treatments both in the vegetative phase (T3) and grain filling (T2) the reductions mentioned in the national and international bibliography were not verified in the present work. There were no significant differences in performance either, the well watered crop registered the maximum value of 12500 kg.ha⁻¹. The induced water deficit in T2 determined a reduction of 58 % of effective water during the grain filling stage which caused 29 % less evapotranspiration in the same one that implied a yield loss closed to 11 %, with the thousand kernel weight being the most affected component. The deficiency in the vegetative stage in T3 caused a diminishment of 48 % of effective water and a 31 % less of evapotranspiration in that phase; as a result there was a reduction around 8% in yield. Meanwhile, the 50 % of well watered crop (T4) registered 7 % less of evapotranspiration which leads to a reduction of 8 % in yield. The relationship between yield and its components such as kernel number and weight did not adjusted in this experiment.

Key words: *Zea mays*; Water deficit; Irrigation.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Abal, G.; Angelo, D. M.; Cataldo, J.; Gutiérrez, A. 2010. Mapa solar del Uruguay; versión 1.0. (en línea). Montevideo, Facultad de Ingeniería. 57 p. Consultado 20 feb. 2015. Disponible en <http://www.fing.edu.uy/if/solar/memoria-mapa-solar-v1.pdf>
2. Aloé, J. M.; Toribio, M. 2008. Como mejorar la eficiencia de uso del agua. PROFERTIL. Investigación y Desarrollo. Boletín no. 14. 8 p.
3. Altamirano, A.; Da Silva, H.; Durán, A.; Echevarría, A.; Panario, D.; Puentes, R. 1976. Carta de reconocimiento del Uruguay; clasificación de suelos del Uruguay. Montevideo, MAP. DSF. t. 1,96 p.
4. Andrade, F. H. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Research*. 41:1-12.
5. _____.; Cirilo, A.; Uhart, S.; Otegui, M. E. 1996a. Ecofisiología del cultivo de maíz. Balcarce, La Barrosa, Dekalbpress, INTA/ UNMP. FCA. 292 p.
6. _____.; Ferreiro, M. 1996b. Reproductive growth on maize, sunflower and soybean at different source levels during grain filling. *Field Crops Research*. 48: 155-165.
7. _____. 1998. Posibilidades de expansión de la producción agrícola. *Interciencia*. 23 (4): 218-226.
8. _____.; Aguirrezabal, L. A. N.; Rizzalli, R. H. 2000a. Crecimiento y rendimiento comparados. *In*: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, Editorial Médica Panamericana. pp. 61-96.
9. _____.; Sadras, V. O. 2000b. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. *In*: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, Editorial Médica Panamericana. pp. 173-206.
10. Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration; guidelines for computing crop water requirements. Roma, FAO. 300 p. (Irrigations and Drainage no. 56).
11. Arbeletche, P.; Ernst, O.; Hoffman, E. 2010. La agricultura en Uruguay y su

evolución. In: García Préchac, F.; Ernst, O.; Arbeletche, P.; Pérez Bidegain, M.; Pristch, C.; Ferenczi, A.; Rivas, M. eds. Intensificación agrícola; oportunidades y amenazas para un país productivo y natural. Montevideo, Tradinco. pp. 13-27.

12. Aydinsakir, K.; Erdal, S.; Buyuktas, D.; Bastug, R.; Toker, R. 2013. The influence of regular deficit irrigation applications on water use, yield, and quality components of two corn (*Zea mays* L.) genotypes. *Agricultural Water Management*. 128: 65 – 71.
13. Baethgen, W. E.; Terra, R. 2010. El riego en un clima cambiante. In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 7-18.
14. Below, F. E. 2002. Fisiologia, nutriçao e abubaço nitrogenada do milho. *Informações Agronomicas. Potafos*. 99: 7-12.
15. Benavides, A. s.f. Fotosíntesis; diferencias en las vías metabólicas C3, C4 y CAM. (en línea).s.n.t. s.p. Consultado 15 abr. 2015. Disponible en <http://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Fotosintesis%20C3,C4%20y%20CAM.pdf>
16. Bolaños, J.; Edmeades, G. O. 1993. La fenología del maíz. (en línea). Síntesis de Resultados Experimentales del PRM. 4: 251-261. Consultado 28 nov. 2015. Disponible en <http://libcatalog.cimmyt.org/download/cis/43343.pdf>
17. Borrás, L.; Westgate, M. E.; Astini, J. P.; Echarte, L. 2007. Coupling time to silking with plant growth rate in maize. *Field Crops Research*. 102: 83-85.
18. Bouazzama, B.; Xanthoulis, D.; Bouaziz, A.; Ruelle, P. Maithol, J. C. 2012. Effect of water stress on growth, water consumption and yield of silage maize under flood irrigation in semi-arid climate of Tadla (Morocco). *Biotechnologie Agronomie Société et Environnement*. 16 (4): 1 – 10.
19. Boyer, J. 1982. Plant productivity and environment. *Agronomie*. 218: 443–448.
20. Boyle, M. G.; Boyer, J.; Morgan, P. W. 1991 Stem infusion of liquid culture medium prevents reproductive failure of maize at low water potential. *Crop Science*. 31 (5): 1246-1252.
21. Cakir, R. 2004. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*. 8 (1):

1-16.

22. Callero, W. H. 2014. Maíz, efecto de las deficiencias hídricas sobre el rendimiento. Tesis. Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 51 p.
23. Campillo, C.; Fortes, R.; Prieto, M. 2012. Solar radiation effect on crop production. (en línea). In: Babatunde, E. B. ed. Solar radiation. s.l., InTech. pp. 167-194. Consultado 23 feb. 2016. Disponible en <http://www.intechopen.com/books/solar-radiation/solar-radiation-effect-on-crop-production>
24. Castaño, J. P.; Giménez, A.; Ceroni, M.; Furest, J.; Aunchayna, R. 2011. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009. Montevideo, INIA. 34 p. (Serie Técnica no. 193).
25. Cardellino, G.; Baethgen, W. E. 2000. Análisis de la viabilidad de sistemas de riego para maíz; estudio de casos y evaluación de estrategias. In: Jornada de Cultivos de Verano (2000, Colonia, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 47-55.
26. Carter, G.; Petrella, P. 2013. Estudio de distintas poblaciones y dosis de nitrógeno en maíz bajo riego. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 56 p.
27. Ceriani, M.; Inella, J. A. 2012. Efecto de la fertilización nitrogenada tardía (V10-11) sobre el rendimiento de maíz en condiciones de riego y secano. Tesis Ing. Agr. Paysandú, Uruguay. Facultad de Agronomía. 66 p.
28. Cirilo, A.; Andrade, F. H.; Otegui, M. E.; Maddoni, G.; Vega, C.; Valentinuz, O. 2015. Ecofisiología del cultivo de maíz. In: Eyherarbide, G. H. ed. Bases para el manejo del cultivo de maíz. Buenos Aires, Argentina, INTA Pergamino. pp. 25-52.
29. Dardanelli, J.; Collino, D.; Otegui, M. E.; Sadras, V. O. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. In: Satorre, E. H.; Benech Arnold, R. L.; Slafer, G. A.; de la Fuente, E. B.; Miralles, D. J.; Otegui, M. E.; Savin, R. eds. Producción de granos; bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Argentina, UBA. Facultad de Agronomía. pp. 325-386.
30. _____.; Severina, I.; Andriani, J. 2010. Funcionalidad de raíces y agua del

subsuelo; su rol en la optimización del riego suplementario. In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 29-37.

31. Della Maggiora, A. I.; Gardiol, J. M.; Irigoyen, A. I. 2000. Requerimientos hídricos. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, Médica Panamericana. pp. 155-171.
32. Dunja, M. B. 2000. Fertilización del cultivo de maíz. (en línea). FONIAP Divulga. 65: s.p. Consultado 23 feb. 2016. Disponible en http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas_tec/FonaiapDivulga/fd65/texto/maiz.htm
33. Durán, A.; Califra, A.; Molfino, J. H. 1999. Suelos del Uruguay según soil taxonomy. (en línea). Montevideo, MGAP. 14 p. Consultado 25 nov. 2015. Disponible en http://cebra.com.uy/renare/media/Suelos_del_Uruguay_segun_Soil_Taxonomy.PDF
34. Ellis, R. H.; Summerfield, R. J.; Edmeades, G. O.; Roberts, E. H. 1992. Photoperiod, temperature and the interval from sowing to tassel initiation in diverse cultivars of maize. *Crop Science*. 32: 1225-1232.
35. English, M. J.; Musick, J. T.; Murty, V. V. 1990. Deficit irrigation. In: Hoffman, G. J.; Towell, T. A.; Solomon, K. H. eds. Management of farm irrigation systems. Michigan, USA, ASAE. s.p.
36. Ernst, O.; Mazzilli, S.; Siri-Prieto, G. 2009. Manejo de la reserva de agua del suelo para situaciones de estrés hídrico. In: Simposio Nacional de Agricultura (1º., 2009 Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Hemisferio Sur. pp. 1-17.
37. Ertek, A.; Kara, B. 2013. Yield and quality of sweet corn under deficit irrigation. *Agricultural Water Management*. 129: 198-144.
38. Espósito, G.; Balboa, G.; Cerliani, C.; Balboa, R.; Castillo, C. 2012. Rendimiento potencial con uso eficiente de agua e insumos (Córdoba, Argentina). (en línea). In: Reunión Internacional de Riego (3ª., 2012, Manfredi). Rendimiento potencial de maíz en Río Cuarto. s.n.t. s.p. Consultado 30 mar. 2016. Disponible en http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-libro_3_reunin_internacional_de_riego_2012.pdf

39. Farré, I.; Faci, J. M. 2009. Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a mediterranean environment. *Agricultural Water Management*. 96: 383 – 394.
40. Fassio, A.; Carriquiry, A. I.; Tojo, C.; Romero, R. 1998. Maíz; aspectos sobre fenología. Montevideo, INIA. pp. 1-50 (Serie Técnica no. 101).
41. Ferres, E.; Soriano. M. A. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*. 58 (2):147–159.
42. García, C. 2010. Estrategias para la incorporación del riego en sistemas de producción extensivas. *In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados.* Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 135-140.
43. García, F. O. 2002. Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo de maíz. *In: Satorre, E. ed. Guía Dekalb del cultivo de maíz.* Buenos Aires, Argentina, Monsanto Argentina. pp. 57-76.
44. García Petillo, M.; Puppo, L.; Hayashi, R.; Morales, P.; Bentancor, L. 2013. Curso de riego y drenaje. Montevideo, Facultad de Agronomía. 266 p.
45. Geerts, S.; Raes, D. 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*. 96: 1275–1284.
46. Giménez, L. 2000. Efecto del riego sobre el rendimiento y calidad de algodón y maíz. *In: Seminario de Investigación Aplicada PRENADER (3º., 2000 Montevideo, Uruguay). Trabajos presentados.* Montevideo, Uruguay, INIA. s.p.
47. _____. 2001. Maíz. Montevideo, Facultad de Agronomía. 76 p.
48. _____. 2010. Efectos de la disponibilidad hídrica en diferentes etapas de desarrollo de maíz y soja. *In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados.* Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 19-28.
49. _____.; García Petillo, M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia (Montevideo)*. 15 (2): 100-108.
50. _____.2012. ¿Cuánto estamos perdiendo por no regar cultivos en Uruguay?

In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (2º., 2012, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 33-41.

51. _____.; García Petillo, M.; Boggiano, P.; Piedrabuena, L. 2014. Riego suplementario en cultivos y pasturas. Montevideo, INIA. 66 p. (Serie Técnica no. 55).
52. Girona, J.; Bonastre, N.; Marsal, J. 2014. Estrategias de gestión del riego eficiente y sostenible; riego deficitario controlado una oportunidad inteligente en el uso de recursos naturales. In: Seminario Internacional (3º., 2014 Paysandú, Uruguay). Riego en cultivos y pasturas. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 78 – 94.
53. Gonzalez-Dugo, V.; Durand, J. L.; Gastal, F. 2010. Water deficit and nitrogen nutrition of crops; a review. *Agronomy for Sustainable Development*. 30 (3): 529-524.
54. Hall, A. J.; Vilell, F.; Trapani, N.; Chimenti, C. A. 1982. The effects of water stress and genotype on the dynamics of pollen-shedding and silking in maize. *Field Crops Research*. 5: 349 – 363.
55. INUMET. DCD (Instituto Uruguayo de Meteorología. Dirección de Climatología y Documentación, UY). 2014a. La primavera 2014. Montevideo. s.p
56. _____. _____. 2014b. El verano 2014. Montevideo. s.p
57. Klocke, N. L.; Scheekloth, J. P.; Melvin, S.; Clark, R. T.; Payero, J. O. 2004. Field-scale limited irrigation scenarios for water policy strategies. *Applied Engineering in Agriculture*. 20 (5): 623-631.
58. Kresovic, B.; Tapanarova, A.; Tomic, Z.; Zivotic, L.; Vujovic, D.; Sredojevic, Z.; Gajic, B. 2016. Grain yield and water use efficiency of maize as influenced by different irrigation regimes through sprinkler irrigation under temperate climate. *Agricultural Water Management*. 169: 34 - 43.
59. Ko, J.; Piccini, G. 2009a. Corn yield responses under crop evapotranspiration-based irrigation management. *Agricultural Water Management*. 96: 799 – 808.
60. _____. _____.; Steglich, E. 2009b. Using EPIC model to manage irrigated cotton and maize. *Agricultural Water Management*. 96 (6): 1323-1331.

61. Lafitte, H. R.; Edmeades, G. O. 1995. Stress tolerance in tropical maize is linked to constitutive changes in ear growth characteristics. *Crop Science*. 35 (3): 820-826.
62. Medrano, H.; Bota, J.; Cifre, J.; Flexas, J.; Ribas-Carbó, M.; Gulías, J. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. (en línea). *Investigaciones Geográficas*. 43: 63-84. Consultado 5 mar. 2016. Disponible en http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/10196/1/IG_43_04.pdf
63. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2015. Regiones agropecuarias del Uruguay. Montevideo. 34 p.
64. _____. 2015. Resultados de la encuesta agrícola “invierno 2015”. Montevideo. 3 p.
65. Molfino, J. H.; Califra, A. 2001. Agua disponible de las tierras de Uruguay; segunda aproximación. Montevideo, MGAP. 12 p.
66. NeSmith, D. S.; Ritchie, J. T. 1992. Maize (*Zea mays* L.) response to a severe soilwater-deficit during grain-filling. *Field Crops Research*. 29 (1): 23-35.
67. O’neill, P. M.; Shanahan, J. F.; Schepers, J. S.; Caldwell, B. 2004. Agronomic responses of corn hybrids from different eras to deficit and adequate level of water and nitrogen. *Agronomy Journal*. 96 (6): 1660-1667.
68. 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. Balcarce, Argentina. Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ciencias Agrarias. 93 p.
69. _____.; Andrade, F. H.; Suero, E. E. 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Research*. 40 (2):87-94.
70. _____. 2009. Bases ecofisiológicas para el manejo del agua en cultivos para grano en condiciones de secano. (en línea). *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*. 44: 16-20. Consultado 16 mar. 2016. Disponible en [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/74910EC30051C2CE8525799500757378/\\$FILE/16.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/74910EC30051C2CE8525799500757378/$FILE/16.pdf)
71. Paliwal, R. L.; Granados, G.; Lafitte, H. L.; Violic, A. D. 2009. El maíz en los

trópicos; mejoramiento y producción. (en línea). Roma, Italia, FAO. s.p.
Consultado 21 dic. 2015. Disponible en
http://www.fao.org/docrep/003/x7650s/x7650s02.htm#P0_0

72. Payero, J. O.; Melvin, S. R.; Irmak, S.; Tarkalson, D. 2006. Yield response to deficit irrigation in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*. 84: 101-112.
73. _____; Tarkalson, D. D.; Irmak, S.; Davidson, D.; Petersen, J. L. 2008. Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*. 92 (12): 895-908.
74. _____; _____; _____; _____. 2009. Effect of timing of a deficit-irrigation allocation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency and dry mass. *Agricultural Water Management*. 96: 1387-1397.
75. Pereira, L. S.; Alves, I. 2005. Crop water requirements. In: Hillel, D. ed. *Encyclopedia of soils in the environment*. London, Elsevier. pp. 322 - 334.
76. Puiatti, J. M.; Rivetti, A. R.; Gómez Abello, G. s.f. Efecto de diferentes programaciones de riego complementario sobre la producción de un cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en Río Cuarto, Córdoba. (en línea). s.n.t. pp. 1-9. Consultado 15 abr. 2016. Disponible en <http://www.ina.gov.ar/pdf/CRA-IVFERTI/CRA-RYD-22-Puiatti.pdf>
77. Rahaman, I.; Hossain, M.; Motofakkerazad, R.; Seyed, L. 2012. Water stress in plants; causes, effects and responses. In: Rahman, I.; Hasegawa, H. eds. *Water stress*. Rijeka, Croacia, Intech. pp. 1-13.
78. Rameau, D.; Van Den Dorpel, M. 2016. Respuesta del maíz a la población y a dos dosis de nitrógeno en condiciones de riego. Tesis Ing. Agr. Paysandú, Uruguay. Facultad de Agronomía. 78 p.
79. Ritchie, S. W.; Hanway, J. J. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service Special Report no. 48. 24 p.
80. Rivetti, A. R. 2006. Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto, Córdoba, Argentina. I. Rendimiento en

grano de maíz y sus componentes. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. 38 (2): 25-36.

81. _____. 2007. Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto, Córdoba, Argentina. II. Producción de materia seca. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. 39 (1): 29-39.
82. Romero, R. 2000. Necesidades de agua de riego en maíz. *In: Jornada de Cultivos de Verano (2000, Colonia, Uruguay)*. Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 7-12.
83. Ruiz, C.; Sánchez, J.; Goodman, M. 1998. Base temperature and heat unit requirement of 49 mexican maize races. *Maydica*. 43: 277-282.
84. Ruiz, F. H.; Marrero, P.; Cruz, O.; Murillo, B.; García, J. L. 2008. Influencia de los factores agroclimáticos en la productividad de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) en una zona árida de Baja California Sur, México. (en línea). *Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 17 (1): 44-47. Consultado 24 nov. 2015. Disponible en <http://www.redalyc.org/pdf/932/93217109.pdf>
85. Saavedra, C. 2011. Un siglo de agricultura. *Revista Plan Agropecuario*. no. 137: 46-48.
86. Sadras, V. O.; Ferreiro, M.; Gutheim, F.; Kantolic, A. G. 2000. Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperíodo. *In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. Buenos Aires, Médica Panamericana. pp. 29-60.
87. Salinas, I. A. 2010. Riego suplementario en cultivos extensivos, panorama de Argentina y experiencia en la región central del país. *In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (1º., 2010 Paysandú, Uruguay)*. Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 39-47.
88. Salvagiotti, F. 2009. Rendimientos potenciales en maíz; brechas de producción y prácticas de manejo para reducirlas. INTA. *Para Mejorar la Producción*. 41: 61-66.
89. _____. 2014. Riego en cultivos y pasturas. *In: Seminario Internacional (3º., 2014, Paysandú, Uruguay)*. Bases para el manejo nutricional en maíz y soja de alto rendimiento. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 177 – 182.
90. Sawchik, J. 2000a. Algunos conceptos básicos para el manejo del riego. *In:*

Jornada de Cultivos de Verano (2000 Colonia, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 47-55.

91. _____.; Formoso, F. 2000b. Inserción del riego en cultivos y pasturas. In: Jornada de Cultivos de Verano (2000 Colonia, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 19-25.
92. _____. 2009. Criterios de manejo para mejorar la eficiencia de uso del agua. *Revista INIA*. no. 17: 79-80.
93. _____.; Mas, C.; Pérez Gomar, E.; Bermúdez, R.; Pravia, V.; Giorello, D.; Ayala, W. 2010. Riego suplementario en pasturas; antecedentes de investigación nacional. In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp 141-153.
94. Setter, T.; Flannigan, B.; Melkonian, J. 2001. Loos kernel set due to water deficit and shade in maize. *Crop Science*. 41 (5): 1541-1553.
95. Stone, P. J.; Wilson, D. R.; Reid, J. B.; Gillespie, R. N. 2001. Water deficit effects on sweet corn. I. Water use, radiation use efficiency, growth, and yield. *Australian Journal of Agricultural Research*. 52 (1): 103 – 113.
96. Suero, E. E.; Gardiol, J. M.; Serio, L.; Irigoyen, A. I.; Della Maggiora, A. I. 2000. Efecto de la disponibilidad de agua del suelo sobre la transpiración, eficiencia de transpiración y rendimiento de un cultivo de maíz (*Zea mays*. L). In: Congresso Brasileiro de Meteorologia (11º., 2000, Rio de Janeiro, Brasil). Trabajos presentados. s.n.t. pp. 293-301.
97. Uhart, S. A.; Andrade, F. H. 1995. Nitrogen shortage in maize. I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning and kernel set. *Crop Science*. 35: 1376-1383.
98. Zhang, H. 2003. Improving water productivity through deficit irrigation; examples from Syria, the North China Plain and Oregon. In: Kinje, J. W.; Barker, R.; Molden, D. eds. *Water productivity in agriculture; limits and opportunities for improvement*. Wallingford, UK, CABI. pp. 301-309.
99. Zinselmeier, C.; Westgate, E.; Jones, R. J. 1995. Kernel set at low water potential does not vary with source/sink ration in maize. *Crop Science*. 35 (1): 158-166.

9. ANEXOS

1. Simuladores de sequía móviles.



2. Fenología del cultivo durante el experimento según predicción INIA.

Fecha de siembra 27-10-2014		
Estadio	Fecha	Duración (días)
emergencia	03-nov.	7
V2 2hojas	09-nov.	13
V4 4hojas	17-nov.	21
V6 6hojas	25-nov.	29
V8 8 hojas	04-dic.	38
V10 10 hojas	11-dic.	45
V12 12 hojas	18-dic.	52
V14 14 hojas	22-dic.	56
V16 16 hojas	25-dic.	59
FM flor masc.	27-dic.	61
R1 flor fem.	30-dic.	64
R2 ampolla	11-ene.	76
R3 lechoso	19-ene.	84
R4 pastoso	25-ene.	90
R5 líneal de leche	06-feb.	102
R6 MF	28-feb.	124

3. Evapotranspiración por tratamiento y etapa del ciclo.

	T1 (mm)	T2 (mm)	T3 (mm)	T4 (mm)
Vegetativo	135,7	108,5	93,1	130,2
Promedio diario (veg.)	3,1	2,5	2,1	3
Período crítico	191,4	172,9	159,4	178,2
Promedio diario (PC)	6	5,4	5	5,6
Llenado de granos	163,7	115,8	150	149,4
Promedio diario (Llen.)	4,2	3	3,8	3,8
Total	490,8	397,2	402,5	457,8

4. Cantidad de riego efectivo aplicado por tratamiento (mm)

ETAPA	BH	RDC Veg. y PC	RDC PC y Llen.	50% BH
Vegetativa	27	14	0	14
PC	48	23	23	23
Llenado	25	0	13	13
TOTAL	100	37	36	50