

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**EVALUACIÓN DEL EFECTO PRODUCTIVO DE DIFERENTES
ESTRATEGIAS DE RIEGO EN MAÍZ**

por

Gonzalo CAMPS AIRES
Mauricio CANELAS BOTTA

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

MONTEVIDEO
URUGUAY
2018

Tesis aprobada por:

Director:-----

Ing. Agr. Luis Giménez

Ing. Agr. Guillermo Siri

Ing. Agr. Lucía Puppo

Fecha: 04 de abril de 2018

Autores:-----

Gonzalo Camps Aires

Mauricio Canelas Botta

AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres por ser el pilar fundamental en nuestras vidas y por brindarnos su apoyo incondicional, no sólo durante la realización de este trabajo, sino a lo largo de toda la carrera.

A todos los amigos y demás familiares que de una forma u otra siempre estuvieron presentes. En especial a los amigos y compañeros Beto, Fermin, Seba y Ruso, y también por la ayuda brindada en la tareas de campo a Richard Arévalo y Matias Van Der Dorpel.

A nuestro tutor Luis Giménez por el apoyo brindado y por habernos guiado durante todo el trabajo.

A la Lic. Sully Toledo por la buena disposición para con nosotros.

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>	2
2.1. <u>MAÍZ EN EL URUGUAY</u>	2
2.1.1. <u>Localización geográfica e historia</u>	2
2.1.2. <u>Área sembrada</u>	2
2.1.3. <u>Producción y rendimiento</u>	2
2.2. <u>CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES PARA LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ</u>	3
2.2.1. <u>Radiación solar</u>	3
2.2.2. <u>Temperatura</u>	5
2.2.3. <u>Precipitaciones</u>	6
2.2.4. <u>Evapotranspiración</u>	7
2.2.5. <u>Características del recurso suelo</u>	8
2.4. <u>RENDIMIENTOS POTENCIALES Y SUS LIMITANTES</u>	8
2.5. <u>DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN EL MAÍZ</u>	10
2.5.1. <u>Efecto de las deficiencias hídricas</u>	10
2.5.2. <u>Materia seca vs. agua</u>	12
2.5.3. <u>Tasa de crecimiento del cultivo</u>	13
2.5.4. <u>Efecto de la disponibilidad hídrica sobre los componentes del rendimiento</u>	15
2.6. <u>ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA</u>	17
2.6.1. <u>Requerimientos hídricos</u>	17

2.6.2. <u>Consumo hídrico</u>	18
2.6.3. <u>Eficiencia en el uso del agua</u>	19
2.7. RIEGO	20
2.7.1. <u>Riego suplementario total</u>	22
2.7.2. <u>Riego deficitario</u>	24
2.7.3. <u>Riego en distintas etapas</u>	26
2.7.4. <u>Distintas estrategias de riego</u>	27
2.7.4.1. Lámina de reposición de riego.....	28
2.7.4.2. Riego en agotamiento fijo.....	29
2.7.4.3. Riego basado en la demanda atmosférica	29
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	31
3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO	31
3.2. MANEJO EXPERIMENTAL	31
3.2.1. <u>Tratamientos</u>	32
3.2.2. <u>Simuladores de sequía</u>	32
3.2.3. <u>Riego</u>	33
3.3. MEDICIONES EFECTUADAS	33
3.4. DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO	34
3.4.1. <u>Hipótesis biológicas</u>	34
3.4.2. <u>Diseño experimental</u>	34
3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	34
3.6. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA EN EL PERÍODO DE CULTIVO.....	35
3.6.1. <u>Precipitaciones</u>	35
3.6.2. <u>Radiación solar incidente</u>	36
3.6.3. <u>Temperatura</u>	37

3.6.4. <u>Evolución del agua disponible en el suelo</u>	38
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	41
4.1. MATERIA SECA TOTAL	41
4.2. RENDIMIENTO EN GRANO.....	42
4.2.1. <u>Efecto de la disponibilidad hídrica sobre los componentes del</u> <u>rendimiento</u>	46
4.2.2. <u>Efecto de las deficiencias hídricas sobre los subcomponentes del</u> <u>rendimiento</u>	48
4.2.2.1. Espigas por planta y número de granos por espiga.....	48
4.2.3. <u>Relación entre rendimiento y componentes del rendimiento</u>	50
4.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO Y EFICIENCIA DE USO DEL AGUA	52
4.3.1. <u>Eficiencia en el uso del agua</u>	54
5. <u>CONCLUSIONES</u>	56
6. <u>RESUMEN</u>	57
7. <u>SUMMARY</u>	58
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	59

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Características físicas e hidrológicas del suelo del campo experimental de la EEMAC.....	31
2. Agua efectiva total por etapas y tratamiento (mm).....	45
3. Número de granos por metro cuadrado (No. granos/m-2) y peso de mil granos (PMG) para los distintos tratamientos evaluados.	46
4. Número de espigas por metro cuadrado, número de espigas por planta y número de granos por espiga para cada tratamiento evaluado.	48
5. Evapotranspiración total del cultivo, eficiencia de uso de agua y rendimiento para los distintos tratamientos evaluados.	51
Figura No.	
1. Precipitaciones medias mensuales.	35
2. Radiación solar (MJ/m ² /día).....	36
3. Radiación solar promedio diaria (MJ/m ² /día) en la EEMAC durante el transcurso del período crítico para la determinación de rendimiento..	37

4. Temperatura promedio mensual (°C).....	38
5. Evolución del porcentaje de AD para los tratamientos de BH durante todo el ciclo a), BH en PC b), BH en PC y llenado de granos c) y riego deficitario al 50% de BH d), respectivamente en orden descendente de la figura..	39
6. Materia seca (kg.ha-1) a cosecha, de cada tratamiento evaluado.....	41
7. Rendimiento (kg ha-1) para los tratamientos evaluados.	43
8. Relación entre el rendimiento en grano (kg ha-1) y el número de granos m ² según cada tratamiento evaluado.....	49
9. Relación entre el rendimiento en grano (kg ha-1) y el peso de 1000 granos (g) según cada tratamiento evaluado.....	50
10. Evolución de la evapotranspiración de cultivo (ETc) diaria de todos los tratamientos.	53

1. INTRODUCCIÓN

El maíz es un cultivo de gran importancia a nivel mundial, ocupando el primer lugar en producción de grano, superando a cultivos como el trigo, el arroz y la soja. De acuerdo al Consejo Internacional de Cereales la producción mundial para la temporada 2016/17 alcanzó un valor de 1035 millones de toneladas. En el Uruguay es de los principales cultivos de verano; siendo este el único que se ha mantenido durante la serie histórica comprendida entre los años 1908 y 2010. Sin embargo, la producción total ha tenido fluctuaciones, registrando producciones mínimas como consecuencia de sequías severas provocadas por años climáticamente desfavorables. En cambio, el mayor volumen de producción, explicado por rendimientos mayores, es consecuencia de temporadas clasificadas como “años Niño” moderados, que son los años climáticamente más favorables para el cultivo (MGAP. DIEA, 2013).

El país se caracteriza por presentar un clima de alta variabilidad con períodos de déficit hídrico a veces muy importantes durante los meses de verano. Esto se debe a la escasa capacidad de almacenamiento de agua de los suelos, a las demandas atmosféricas elevadas del verano, y a la irregularidad de las precipitaciones, que generalmente no cubren las necesidades de los cultivos (Giménez, 2012a). Esto trae como consecuencia una gran variación en los rendimientos. Así es que la limitante principal de los ambientes de producción en primavera y verano para cultivos realizados en secano es la ausencia de condiciones hídricas adecuadas para lograr rendimientos elevados, siendo esta la determinante principal de los bajos rendimientos (Giménez, 2012a).

En ese entendido, el riego suplementario es la tecnología que permite levantar dicha limitante ambiental para los cultivos de verano en el Uruguay (Giménez y Mosco, 1996). Los rendimientos potenciales de maíz bajo riego, han sido evaluados en experimentos realizados por Giménez (2012a) en nuestro país durante las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012, encontrando rendimientos que variaron entre 13 y 15 t ha⁻¹, ubicándose muy por encima del rendimiento medio para maíz de secano, el cual se ubica en torno a las 5 t ha⁻¹ (MGAP. DIEA, 2013).

Sin embargo, conocer la respuesta productiva del maíz a diferentes disponibilidades hídricas es un aspecto relevante para poder definir las estrategias de manejo del agua de riego más adecuada a las condiciones del país. En este entendido, se planteó como objetivo del presente trabajo evaluar el comportamiento productivo del maíz ante diferentes alternativas de manejo del agua de riego.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. MAÍZ EN EL URUGUAY

2.1.1. Localización geográfica e historia

La agricultura de secano ha estado concentrada tradicionalmente en la región del litoral oeste. Dicha región agroeconómica se asocia a los suelos de mayor aptitud agrícola en los departamentos de Soriano, Colonia, Río Negro, Paysandú y Flores (MGAP. DIEA, 2003).

El Uruguay históricamente produjo aproximadamente 200 mil toneladas anuales de grano de maíz destinadas al consumo interno, básicamente para la elaboración de raciones utilizadas en la alimentación de ganado lechero, cerdos y aves. Actualmente se usa maíz en la alimentación de vacunos de carne y leche, así como en una industria avícola que ha aumentado su producción y exportación de carne (MGAP. DIEA, 2003).

2.1.2. Área sembrada

La siembra de maíz se ubicó en el eje de las 200 mil ha por año entre 1908 y comienzos de la década del 50. En ese momento comienza un período de aumento del área que incluye un pico de tres zafras consecutivas (1956, 1957 y 1958), que superan las 300 mil ha. A partir de esos años el área decreció en forma prácticamente lineal, hasta caer por debajo de las 100 mil ha en 1982; superficie que no se superó hasta la siembra 2009/2010, donde se llegó a un valor cercano a las 108 mil ha sembradas (Saavedra y Fagúndez, 2013).

El cultivo tiene más de 70 zafras que superan las 150 mil ha sembradas a lo largo del periodo comprendido entre los años 1908 y 2010. En 28 de las últimas 29 zafras el área se ubicó entre 40 y 100 mil ha por año (Saavedra y Fagúndez, 2013).

2.1.3. Producción y rendimiento

A partir del análisis de la serie de datos desde 1960 a 2010 (MGAP. DIEA, 2013) se extrae que la producción total de maíz ha tenido fluctuaciones a lo largo de los años, alcanzando un mínimo de 64 mil toneladas en la zafra 1999/2000, lo que se debió a los bajos rendimientos obtenidos y a una importante reducción de área sembrada, como consecuencia de una sequía severa provocada por un año climáticamente desfavorable (“año Niña”). En cambio, el mayor volumen de producción de 527 mil

toneladas se observa en la zafra 2009/2010, y fue debido principalmente a mayores rendimientos por hectárea, entre otros factores consecuencia de un “año Niño”, climáticamente favorable para el cultivo (MGAP. DIEA, 2013)

En relación a los rendimientos, se observa una tendencia clara de aumento de los mismos, a partir de la década del noventa, debido principalmente a mejoras tecnológicas tales como: materiales genéticos con mayor potencial de rendimiento, mayor fertilización e incrementos en las poblaciones utilizadas. Los rendimientos anteriores a la década del noventa se ubicaban por debajo a 1000 kg ha^{-1} en promedio, mientras que en el presente los promedios superan ampliamente estos valores, alcanzando rendimientos cercanos a 5000 kg ha^{-1} . Por otra parte, el maíz con riego es cada vez más frecuente, y en esas áreas la productividad supera los $10.000 \text{ kg ha}^{-1}$ (MGAP. DIEA, 2013).

2.2. CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES PARA LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ

2.2.1. Radiación solar

La radiación solar es la fuente de energía necesaria para que las plantas fijen el carbono del aire a través de la fotosíntesis, actuando conjuntamente con otros recursos ambientales, como los nutrientes y el agua, generando el crecimiento y rendimiento de los cultivos (Martínez, 2015).

La radiación solar incidente (Rinc), en nuestro hemisferio se llega a un máximo valor el día 21 de diciembre, fecha a partir de la cual comienza a disminuir hasta un valor mínimo el 21 de junio. Un factor muy influyente sobre la misma es la latitud, que afecta principalmente la duración del día y la intensidad de radiación que llega a un determinado lugar, debido al ángulo de incidencia de los rayos solares sobre el suelo. Sin embargo, la nubosidad de cada zona puede generar diferencias en los valores de radiación para una misma latitud, así como la altitud del terreno y la inclinación del mismo (Martínez, 2015).

Por otro lado, la radiación interceptada por el cultivo es diferente a la que realmente es absorbida y por lo tanto esto, introduce variaciones en el cálculo de la eficiencia de uso de la radiación (Lindquist et al., 2005). En acuerdo con Sinclair y Muchow (1999), Bohnomme (2000) sugiere que para un índice de área foliar (IAF) alto es correcto asumir que el 85% de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) interceptada es absorbida por el canopeo de las hojas, mientras que el porcentaje es menor cuando el canopeo es menos denso; en este sentido asevera que la intercepción de la radiación solar, además de estar primeramente determinada por el IAF, también se determina por un índice de la eficiencia en la intercepción de la radiación, el coeficiente de extinción (kc). Teniendo en cuenta estos conceptos, Martínez (2015) pone en

manifiesto la relación directa existente entre una mayor radiación solar incidente diaria durante el ciclo del cultivo, y un mayor crecimiento, y por lo tanto mayor rendimiento potencial.

El área foliar, es el área fotosintéticamente activa, la cual determina la disponibilidad de carbohidratos para cumplir las funciones de mantenimiento de la planta para su propio crecimiento y para el llenado de grano (Fassio et al., 1998), por lo tanto la evolución del IAF será en definitiva quien defina la dinámica de intercepción de radiación solar por el cultivo. Por consiguiente, para que el maíz logre una alta producción de materia seca, el cultivo debe generar tempranamente altos valores de IAF, que permitan interceptar rápidamente la máxima proporción de radiación solar incidente (denominado IAF crítico) y a su vez debe tratar de mantener ese valor de IAF durante la mayor cantidad de tiempo posible (duración del área foliar, Martínez, 2015).

La relación entre materia seca acumulada y radiación interceptada ha sido denominada eficiencia de uso de la radiación, o eficiencia de conversión de la radiación (ec) en biomasa (Monteith y Moss, 1977). El maíz presenta valores más altos de ec respecto de las demás especies estivales cultivadas y una mejor ec, respecto de otros cultivos agrícolas, dada por ser una planta de metabolismo C4 que no presenta fotorespiración detectable, esto le confiere un ritmo fotosintético entre un 30 y un 40% mayor que las plantas C3 (Martínez, 2015). Por otro lado, dicho cultivo tiene una estructura de canopeo más erectófila y mayor separación vertical entre hojas, confiriéndole un menor coeficiente de extinción lumínico que le posibilita una mayor penetración y distribución más uniforme de la radiación en el perfil del canopeo.

La tasa de crecimiento del cultivo está positivamente asociada con la cantidad diaria de radiación interceptada (Fischer y Palmer, citados por Martínez, 2015). De forma similar, la biomasa total acumulada hasta madurez fisiológica está relacionada con la radiación total interceptada (Andrade et al., 1996). Por lo que la cantidad de radiación solar interceptada acumulada por el maíz dependerá de la duración del ciclo y de la dinámica de intercepción de dicho cultivo (Martínez, 2015).

2.2.2. Temperatura

La temperatura es otro de los factores que afecta la tasa de crecimiento del cultivo, actuando sobre las tasas de respiración y de fotosíntesis. No obstante, el mayor efecto de la temperatura es modificar la duración de las distintas etapas ontogénicas del cultivo (Fassio et al., 1998). Así que en el maíz, el pasaje de una etapa fenológica a la siguiente se produce en base a una acumulación térmica por encima de un umbral, denominado temperatura base (tb). Las temperaturas por encima de la tb se acumulan como suma térmica o grados día ($^{\circ}\text{C d}$, Martínez, 2015). La tb es una constante independiente del cultivar y del ambiente y corresponde a la temperatura por debajo de la cual el crecimiento de la especie es nulo. Por otro lado, la temperatura óptima corresponde a la temperatura en la cual la tasa de desarrollo es máxima (Fassio et al., 1998). En este sentido, Hoeft et al. (2000) señalan que la temperatura diurna óptima para el crecimiento del cultivo se ubica entre 25 y 30 $^{\circ}\text{C}$; siendo la tb de 8 $^{\circ}\text{C}$ y la máxima admisible de aproximadamente 40 $^{\circ}\text{C}$, la cual usualmente causaría el cese del desarrollo (Birtch et al., citados por Hoeft et al., 2000).

Una de las formas de estimar la duración de los estadios fenológicos en el maíz es a través de los requerimientos térmicos (suma térmica); definiéndose esta como la estimación de la suma de las temperaturas medias diarias entre la temperatura base (Tb) y la temperatura óptima (To, Fassio et al., 1998).

Las temperaturas que estén por fuera del rango de adaptación del cultivo pueden impactar negativamente en factores como la fotosíntesis, translocación y viabilidad del polen (Lafitte, 2001). En particular, las temperaturas demasiado altas tienen un impacto negativo en el crecimiento del grano, peso del grano y acumulación de proteína (Jones et al., Monjardino et al., citados por Hoeft et al., 2000). Por otra parte, las temperaturas por debajo de 0 $^{\circ}\text{C}$ son frías lo suficiente como para causar daños en el aparato fotosintético de las hojas, pero también temperaturas nocturnas entre 20 y 25 $^{\circ}\text{C}$ incrementan las tasas de respiración, reduciendo de esta forma la acumulación de materia seca en la planta (Hoeft et al., 2000).

La fotosíntesis en el maíz es función de la temperatura diurna, mientras que el desarrollo lo es de la temperatura diurna y nocturna, lo ideal para el cultivo es contar con ambientes de alta amplitud térmica (Martínez, 2015); lo que concuerda con Hoeft et al. (2000), quienes citan que los mayores rendimientos de maíz son a menudo producidos en zonas con baja humedad y una mayor amplitud térmica. En las condiciones de Uruguay no se observan limitantes en cuanto a temperaturas requeridas para las distintas etapas fenológicas del cultivo. No obstante cabe mencionar que las temperaturas nocturnas son elevadas, principalmente en la zona norte del país, lo que por consiguiente disminuye la amplitud térmica, imponiendo una limitante para alcanzar rendimientos potenciales mayores.

2.2.3. Precipitaciones

Las precipitaciones son una medida indirecta del agua realmente disponible en el suelo, ya que una parte de la lluvia se pierde por escurrimiento superficial, otra se pierde por evaporación directa, y una parte de esta es la que percola en profundidad. De esta forma, el agua de real importancia para el cultivo es aquella que se retiene contra la fuerza de la gravedad. Por lo tanto, para caracterizar el régimen hídrico del país es conveniente analizar en primer término al factor lluvia, dado que esta es la fuente principal de agua (Durán, 1986).

Según Carámbula y Terra (2000), el régimen pluviométrico de Uruguay presenta características muy particulares las cuales pueden ser definidas mediante tres parámetros básicos: cantidad, intensidad y distribución de lluvias, de acuerdo con estos autores la distribución de lluvias es uno de los factores más importantes del régimen pluviométrico. Las mismas son distribuidas en forma muy variable y por consiguiente se registran períodos tanto de déficits hídricos como de excesos de humedad en cualquier época del año. En este sentido manifiestan que dicha variabilidad de las lluvias es prácticamente constante en las diferentes zonas del país y aunque los valores medios que normalmente se citan no lo revelan, ello determina desbalances importantes en la producción de los cultivos.

Los valores medios de precipitación acumulada anual sobre el país se sitúan entre 1200 y 1600 milímetros (mm) con los menores valores situados al suroeste (departamento de Colonia) y los máximos al noreste (departamentos de Rivera y Artigas, Castaño et al., 2011). El gradiente por lo tanto es incremental de suroeste a noreste; habiéndose registrado las precipitaciones máximas acumuladas en la Estación Meteorológica de Artigas con 1092 mm en el verano 1997-98 y la mínima con 69.0 mm en la Estación Meteorológica Florida en el año 1978-79 (INUMET, 2014). Cabe destacar en este sentido que años con excesos o déficits muy pronunciados pueden estar relacionados con fenómenos climáticos, “año Niña” o “año Niño”.

En términos generales, cuando en ciertas zonas del océano Pacífico se ha detectado la fase oceánica fría (“La Niña”), con intensidad moderada a fuerte, ello ha estado históricamente asociado en Uruguay con aumento de la presión atmosférica, enfriamiento y desecamiento del aire, así como déficit de lluvias (Carámbula y Terra, 2000). Por otro lado, cuando en ciertas zonas del océano Pacífico se ha detectado la fase oceánica cálida (“El Niño”) con intensidad moderada a fuerte, ello ha estado históricamente asociado en el país con disminución de la presión atmosférica, calentamiento y humedecimiento del aire, así como con lluvias por encima de la media (Bidegain y Caffera, 1999).

Si bien lo anteriormente expresado es cierto, en general hay que considerar que existe una gran variabilidad entre años y no siempre los fenómenos “el Niño/la Niña” son bien definidos, lo cual limita la capacidad para establecer pronósticos climáticos, además dentro de un mismo año, hay meses o grupos de meses en los cuales “la señal” del Pacífico es más o menos fuerte, por lo que las probabilidades de ocurrencia también varían, llegando inclusive a que no exista ninguna capacidad para establecer pronósticos climáticos con un nivel de probabilidad razonable (Baethgen, 1999).

2.2.4. Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) es el proceso por el cual el agua es transferida desde el suelo hacia la atmósfera, incluyendo evaporación desde la superficie del suelo o de la planta y transpiración a través de los tejidos (Della Maggiora et al., 2000a). Por consiguiente, las necesidades de agua de los cultivos son variables y corresponden a la ET que presentan en el ambiente en el que se desarrollan, y a la aplicación de la tecnología utilizada en cada situación productiva (Pereira y Alves, 2005).

Por otro lado, la ET de los cultivos bajo condiciones estándar para FAO (Allen et al., 1998) se denomina ET_c y refiere a la ET cuando el cultivo se encuentra bajo óptimas condiciones de suelo, agua y manejo y alcanza el rendimiento potencial. La evolución de la ET_c está regulada por la demanda atmosférica dada por las condiciones meteorológicas y por los factores que determinan el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Della Maggiora et al., 2000a).

Los valores medios de ET_c acumulada anual estimada por el método Penman-Monteith se sitúan entre 1000 y 1200 mm, con los menores valores situados al sureste, y los máximos situados al noroeste del país (Castaño et al., 2011). Esta variable presenta, para el promedio de los años analizados, un claro comportamiento estacional, con los valores máximos en verano (160-185 mm/mes), seguido de la primavera (95-105 mm/mes), el otoño (65-80 mm/mes) y el invierno con 25-35 mm/mes (Castaño et al., 2011).

Por otro lado, al comparar los valores de precipitaciones y ET_c se aprecia que a partir de octubre la ET_c es mayor a la precipitación, situación que se mantiene hasta febrero inclusive. En consecuencia, en este período no es posible satisfacer la demanda máxima por agua, lo que determina que la evapotranspiración real (ET_r) sea menor que la ET_c, provocando estrés hídrico en el cultivo; siendo la ET_r directamente proporcional al aporte de agua de la precipitación, al contenido de agua disponible en el suelo y a la presencia de cobertura vegetal (Fassio et al., 1998).

2.2.5. Características del recurso suelo

A pesar de su extensión reducida, sin accidentes geográficos importantes y un clima muy similar en todo su territorio, el Uruguay presenta una variabilidad significativa de tipos de suelos, originada por la diversidad de litologías de los materiales geológicos y por la variación local de topografía y drenaje (Durán y García Préchac, 2007). Así es que la textura y profundidad de un suelo incide directamente en la disponibilidad de agua del mismo (el agua en suelos de tipo arenoso está retenida con menos fuerza que en suelos de tipo arcilloso). Es así que para evaluar las relaciones hídricas de las plantas es necesario evaluar cuantitativamente la humedad disponible en el suelo, las características de retención de agua y la demanda atmosférica (Fassio et al., 1998).

La cantidad de agua almacenada en los suelos del país es normalmente insuficiente para satisfacer las demandas de agua del cultivo y los rendimientos en secano dependen en su mayor parte de la lluvia durante los meses de la floración (fines de diciembre y enero, Baethgen y Giménez, 2002). El grado de estrés variará con el tipo de suelo debido a las diferentes características en cuanto a la retención de agua (Fassio et al., 1998).

Por otra parte, Molino y Califra (2001) destacan que la mayoría de los suelos sobre los que se realiza agricultura en el país presentan una capacidad de almacenamiento de agua disponible (CAAD) que varía entre 80 y 160 mm. En las mejores situaciones, la CAAD de los suelos cubre aproximadamente la tercera parte de las ETC estimadas para los cultivos de verano en la región (Della Maggiora et al., 2000a). Dada la escasa CAAD de los suelos es notoria, la elevada dependencia de las recargas hídricas para lograr un abastecimiento ajustado a las demandas de los cultivos y en secano, las recargas provienen fundamentalmente de las precipitaciones (PP, Giménez y García Petillo, 2011). Esto es una limitante para la expresión del potencial productivo y una fuente importante de variación de rendimiento (Sawchik y Formoso, 2000).

2.4. RENDIMIENTOS POTENCIALES Y SUS LIMITANTES

Los rendimientos potenciales son los que teóricamente se lograrían cuando se optimizan las reacciones bioquímicas que determinan el rendimiento (fotosíntesis, translocación, síntesis de compuestos, Salvagiotti, 2009). En este mismo sentido Sinclair (1993), Evans y Fischer (1999), definen el rendimiento potencial de un cultivo como la producción alcanzada cuando las plantas crecen con condiciones no limitantes de agua y nutrientes, empleando un cultivar adaptado a ese ambiente y con un control efectivo de factores causantes de estrés como malezas, plagas, y enfermedades.

En esta situación el rendimiento de una especie está dado por factores que tienen una marcada influencia sobre el desarrollo, crecimiento y rendimiento del cultivo (Andrade et al., 2000a); así la radiación, que determina la fotosíntesis y la temperatura, que determina la longitud del ciclo, modifican directamente el rendimiento (Andrade et al., 1996). Por consiguiente, los altos rendimientos en maíz están asociados con ambientes de alta radiación solar y temperaturas óptimas, maximizándose el mismo cuando la amplitud térmica (diferencia entre la temperatura del día y de la noche) se incrementa (Cantarero et al., 1999), debido a que temperaturas diurnas elevadas (alrededor de 30 °C) posibilitan una alta fotosíntesis (Andrade et al., 1996), y las temperaturas nocturnas frescas disminuyen la respiración y retrasan el desarrollo fenológico, prolongando los días de aprovechamiento de la radiación incidente (Sadras et al., 2002).

Cabe mencionar también al mejoramiento genético como un factor de suma importancia en el aumento del potencial productivo del cultivo, consecuentemente la elección del material genético constituye una decisión muy importante para explorar potencialidad de rendimiento (Espósito et al., 2015), ya que en esquemas de alta producción encontrarán las condiciones necesarias para su expresión (Andrade, 2000c).

Las variaciones anuales en los rendimientos serán consecuencia de la diferente disponibilidad de radiación, agua y nutrientes, así como también de los diferentes regímenes térmicos. La maximización de la producción estará ligada al manejo del agua, que es el factor más limitante. En esta situación, la productividad de los cultivos está vinculada a las variaciones en la ocurrencia de precipitaciones y a la capacidad de almacenamiento de agua de los suelos. Por lo tanto el manejo del agua en los diferentes sistemas de producción será el factor principal sobre el cual trabajar para disminuir las brechas de producción en maíz (Salvagiotti, 2009). En tal sentido, Boyer (1982) establece que en los cultivos agrícolas se presentan un conjunto de limitantes para la obtención de los rendimientos potenciales, pero las deficiencias hídricas, especialmente en los cultivos de verano realizados en secano, se destacan como el factor principal en causar pérdidas en los rendimientos.

Teniendo en cuenta todo lo citado anteriormente sobre los factores que afectan los rendimientos potenciales en maíz, se destaca que en Uruguay, en condiciones experimentales, sin limitantes nutricionales y con riego suplementario, se han logrado, según Giménez et al. (2014), rendimientos cercanos a 15 t ha⁻¹. En cambio, según información recabada de otros países por Espósito et al. (2015), se han reportado rendimientos cercanos a las 20 t ha⁻¹; a inicios de la década del 70 en Michigan se cosecharon 19,7 t ha⁻¹, en Illinois se registró un rendimiento de 19,6 t ha⁻¹ y en el año 2000 Murrell y Childs llegaron a las 20,9 t ha⁻¹ (Tollenaar y Lee, 2002). En Argentina Luque et al. (2006) encontraron híbridos cuya producción potencial fue de 17 t ha⁻¹. Martínez et al. (2012), al norte de la región patagónica, alcanzaron rendimientos de 20 t

ha⁻¹. Por lo tanto, cabe concluir que estas diferencias se deben principalmente a factores climáticos, tales como radiación y temperatura (amplitud térmica), lo cual hace que los rendimientos potenciales alcanzables por otros países sean mayores a los que se pueden alcanzar en Uruguay.

2.5. DISPONIBILIDAD HIDRÍCA EN EL MAÍZ

2.5.1. Efecto de las deficiencias hídricas

El agua es una parte integral del cuerpo de la planta que desempeña un papel importante en el crecimiento inicial, en el mantenimiento del proceso de desarrollo de la vida vegetal y por lo tanto tiene una función fundamental en la producción del cultivo (Aslam et al., 2012). En este mismo sentido, los mismos autores afirman que el agua es un agente de enfriamiento que juega un papel muy importante en el funcionamiento del cuerpo de la planta.

Los cultivos de verano realizados en secano poseen como principal limitante la disponibilidad hídrica en primavera y verano, la cual es por consiguiente la determinante fundamental del rendimiento. Cuando la disponibilidad de agua no es adecuada a los requerimientos en las diferentes etapas de desarrollo, los cultivos disminuyen su potencial productivo (Giménez et al., 2014).

El maíz es el cultivo de verano de mayor demanda de agua en el suelo, la característica de ser un cultivo de tipo C4 determina que sea una de las especies de mayor eficiencia en el uso de agua. Esto hace que el cultivo sea extremadamente sensible a la cantidad y distribución de las precipitaciones durante la estación de crecimiento, siempre que el paquete tecnológico aplicado sea el adecuado (Romero, 2000).

En Uruguay, uno de los períodos de lluvia más críticos para la producción agropecuaria es el final de la primavera y el verano (octubre - febrero). Las condiciones de lluvia promedio durante los meses de verano (90-130 mm por mes, dependiendo del lugar) no son suficientes para compensar las pérdidas por evapotranspiración (Baethgen y Giménez, 2002). En consecuencia, dicho déficit hídrico durante el crecimiento es uno de los factores ambientales que más afectan la estabilidad de la producción de granos en cereales.

En el maíz, la reducción en producción de granos por efecto del déficit hídrico es función del estadio de desarrollo de la planta, de la intensidad y la duración de la sequía y de la sensibilidad del cultivar (Lorens et al., 1987). El estrés causado por la

sequía tiene efectos perjudiciales sobre el establecimiento de la planta, crecimiento vegetativo, fotosíntesis, crecimiento de las raíces, la anthesis, el intervalo antes-floración femenina, la polinización y la formación de grano en el cultivo de maíz (Aslam et al., 2012). En situaciones de sequía las condiciones de potencial hídrico y turgencia disminuyen, lo cual perturba el normal funcionamiento de cuerpo de la planta (Hsiao, 1973). En cuanto a la etapa vegetativa del cultivo, Sharma y Bhalla (1990) concluyeron, mediante un experimento utilizando plantas de maíz tolerantes y plantas sensibles en respuesta a estrés hídrico, que la elongación del tallo, la acumulación de materia seca y el tamaño del área foliar fue menor en plantas sensibles sometidas a estrés hídrico durante dicha etapa.

La disminución en las tasas fotosintéticas del cultivo ha sido apuntada por distintos autores como una de las consecuencias más importantes del estrés hídrico. La reducción del crecimiento foliar, resultante del estrés hídrico, provoca la disminución de los sitios de utilización de los productos fotoasimilados, los cuales, a su vez, pueden influir en la tasa de fotosíntesis (Magalhaes y Da Silva, 1987). La fotosíntesis en el maíz disminuye significativamente cuando el potencial hídrico de la hoja es menor a 3.5 atm en tanto que, en condiciones de deficiencia hídrica pequeña, en torno a 1.0 atm, se verificaron reducciones de hasta el 50% en la tasa de fotosíntesis aparente (Baker y Musgrave, 1964).

El lapso de tiempo que se extiende desde unos 15 días antes, hasta unos 20 días después de la floración es el período crítico (PC) en la fijación del rendimiento en el cultivo de maíz (Andrade, 1992). Con respecto a esto, distintos autores afirman que el maíz es particularmente susceptible al estrés hídrico en la etapa de floración, cuando el potencial de rendimiento está siendo establecido (Birch et al., 2003) especialmente ya que esto coincide con valores altos de evapotranspiración de mediados de verano (Farnham et al., 2003). En tanto, se ha demostrado que la sensibilidad del cultivo de maíz al déficit hídrico declina en el siguiente orden: floración > llenado de granos > etapa vegetativa (Musick y Dusek, 1978). En coincidencia con estos autores, Shaw (1974) asevera que cuando el estrés se produce en etapas vegetativas o en llenado de granos, el efecto sobre el rendimiento es sensiblemente menor.

El efecto de la falta de agua asociado a la producción de granos es particularmente importante en tres estadios de desarrollo de la planta. El primer estadio se refiere a la iniciación floral y al desarrollo de la inflorescencia, momento en que se determina el número potencial de granos; el segundo se refiere al período de fecundación, que es cuando se fija el potencial de producción; y el tercero es la fase de llenado de grano, en el cual ocurre la acumulación de materia seca (Magalhaes y Da Silva, 1987).

2.5.2. Materia seca vs. agua

La acumulación de materia seca (MS) de la planta depende del total de carbono fijado por la fotosíntesis y la fracción de ese carbono convertido en MS (Norman y Arkebauer, 1991). En ausencia de estrés biótico y abiótico, la acumulación de MS de la planta depende de la cantidad de radiación absorbida por el canopy (Sinclair y Muchow, 1999). Así mismo, diferentes autores coinciden en que la sequía afecta en general el crecimiento y desarrollo de las plantas (Outtar et al. 1987, NeSmith y Ritchie 1992), y han relacionado estrechamente la reducción del área foliar con reducción del rendimiento (Saini y Westgate, 1999).

Para que el maíz logre una alta producción de MS, el cultivo debe generar tempranamente altos valores de IAF que permitan interceptar rápidamente la máxima proporción de radiación solar incidente (que se logra una vez alcanzado el valor mínimo de IAF con el cual el 95% de la radiación solar incidente es interceptada, denominado IAF crítico) y a su vez debe tratar de mantener ese valor de IAF durante la mayor cantidad de tiempo posible (Martínez, 2015).

La producción de MS de un cultivo se puede considerar en función del agua transpirada y de la eficiencia con que la planta la aprovecha en términos de biomasa. Un déficit hídrico provoca una menor disponibilidad de agua para transpirar, afectando directamente el intercambio gaseoso a nivel estomático entre el cultivo y la atmósfera. Por tanto, existe una menor deposición de CO₂ a través del proceso de fotosíntesis y como consecuencia de las deficiencias hídricas ocurre una menor fijación de biomasa (Hsiao y Bradford 1983, Sinclair et al. 1984). Los resultados encontrados por Sawchik y Formoso (2000) en ensayos realizados en maíz con riego en la Estanzuela para dos años contrastantes climáticamente (1998/99) reafirman estos conceptos. Dichos autores reportan datos de producción de 24,7 t ha⁻¹ de MS en todo el ciclo de cultivo en un año con precipitaciones abundantes y bien distribuidas (1998). Por otro lado, para el siguiente año, considerado como “año Niña”, encontraron una producción de 22,7 t ha⁻¹ de MS.

Giménez (2010), en experimentos realizados en maíz con riego en Paysandú, obtuvo producciones de MS superiores a las 20 t ha⁻¹ en todo el ciclo del cultivo. Della Maggiora et al. (2000a), por su parte señalan una producción de MS total de 26,5 t ha⁻¹, para ensayos realizados en Balcarce, en tratamientos sin deficiencias hídricas.

Cerca de V10 (35 días en promedio, pos-emergencia) la planta comienza un rápido incremento en la acumulación de MS que continuará hasta la etapa reproductiva avanzada. Se requieren altas cantidades de nutrientes y agua del suelo para cumplir con la demanda (Fassio et al., 1998). Cuando se alcanza el estadio R6 todos los granos en la

espiga han alcanzado su máximo peso seco o máxima acumulación de MS, y se forma una abscisión marrón o negra en la zona de inserción del grano a la mazorca (punto negro o capa negra). Esta abscisión es un buen indicador de la máxima acumulación de MS (madurez fisiológica) y señala el final de crecimiento del grano (Fassio et al., 1998).

Según datos reportados por Avendaño et al. (2008), en ensayos realizados con maíz en respuesta a distintos niveles de estrés hídrico se encontró que la biomasa total se redujo gradualmente con el aumento de la intensidad de la sequía, en los distintos cultivares utilizados en el experimento. Esta disminución es debida principalmente a una menor producción de granos, a una menor altura de planta y a un menor número de hojas. En este sentido, Payero et al. (2008) afirman que la MS de toda la planta y de cada uno de sus componentes se ven incrementados con el aumento de la ETc. Por lo tanto para que la producción de MS se vea maximizada, es indispensable mantener una alta ETc, y para eso se debe evitar la ocurrencia de déficit hídrico.

El rendimiento del maíz está linealmente relacionado con la producción de MS de planta (coeficiente de correlación $R^2=0,93$); lo que según los autores estaría explicado en que el 59% de la MS producida se debe a los granos, los cuales son el principal componente del rendimiento (Payero et al., 2008). En situaciones de no deficiencia entre la emergencia y la floración del maíz se fija el 40% de la MS total y desde esta etapa a madurez fisiológica el cultivo fija el 60% restante (Andrade et al., 1996). La literatura es coincidente en señalar que la repercusión en el rendimiento es menor cuando las deficiencias hídricas ocurren durante las etapas vegetativas en comparación a cuando suceden en las etapas reproductivas. En ensayos realizados por Giménez (2010) se concluye que deficiencias hídricas en la etapa de llenado de grano no sólo detuvieron la deposición de MS, sino que también disminuyó la MS aérea depositada. En este sentido el autor señala que este comportamiento se debe a que en las etapas avanzadas del cultivo las deficiencias hídricas provocan la muerte de hojas en maíz, con efectos negativos esperables en el rendimiento.

2.5.3. Tasa de crecimiento del cultivo

La tasa de crecimiento del cultivo es una función lineal de la radiación interceptada (Shibles y Weber, 1966), e indica la acumulación de materia seca por unidad de superficie de suelo y por unidad de tiempo (Radford, 1967).

De acuerdo a Andrade y Sadras (2000b), el umbral para fijar grano en el maíz se ubica en valores del orden de 1 a 1,4 gr./pl/día con variaciones de acuerdo al material genético. Con respecto a esto, dichos autores encontraron, en ensayos con un híbrido

DK636, que con tasas de crecimiento en floración inferiores a 1 gr/pl/día en promedio se produjeron sólo plantas estériles. El alto umbral de tasa de crecimiento requerido por el cultivo para fijar granos se debe a que la espiga del maíz es una estructura axilar relegada en floración, sometida a dominancia de la panoja y del tallo, por lo que las bajas tasas de crecimiento por planta tendrían como consecuencia una reducción en la partición de biomasa a dicho órgano (Andrade y Sadras, 2000b).

Asimismo, la tasa de crecimiento del cultivo se ve afectada negativamente ante las deficiencias hídricas con disminución en la eficiencia de intercepción de la radiación solar y de conversión de la misma en biomasa (Muchow, 1989). En tal sentido, Otegui (1992) encontró que sequías de un mes de duración inducidas por exclusión de lluvias con coberturas plásticas en suelos profundos de Balcarce redujeron las tasas de crecimiento del maíz en un 15%.

Existe una buena correlación entre la tasa de crecimiento del cultivo en el PC y el número de granos (NG) fijados. Por esta razón, las deficiencias hídricas durante etapas previas a este momento crítico, que pueden reducir la expansión foliar y la tasa fotosintética, afectarán el rendimiento solamente si estas reducciones de crecimiento temprano persisten y afectan el crecimiento en los momentos más críticos de determinación del rendimiento (Andrade y Sadras, 2000b). Por lo tanto, desde un punto de vista funcional, las diferencias observadas en los valores medios de NG entre cultivos están asociadas a los ritmos de crecimiento del maíz durante el PC alrededor de floración. La presencia de un estrés hídrico o nutricional en este momento reduce la tasa de crecimiento del cultivo en el PC de generación de NG y esto produce marcadas reducciones en el rendimiento (Satorre, 2002), consecuentemente, cuanto mayor sea el estrés menor será la tasa de crecimiento de la planta y, por lo tanto, menor el NG fijados llegando, en casos extremos, a la esterilidad total de la planta (Andrade et al., 1999).

El NG final por metro cuadrado es función de la tasa de crecimiento del cultivo a floración. Esta tasa explica significativamente, en un 74%, el NG logrados (Maturano, 2002). De esta forma el NG por espiga parece ser independiente del grado de diferenciación floral alcanzado en R1, y más relacionado con la tasa de crecimiento de la espiga alrededor de floración (Otegui y Melón, 1997).

Giménez (2012a), a través de datos obtenidos en ensayos de maíz con estrés hídrico provocado en diferentes etapas de desarrollo, sostiene que deficiencias en el peso medio de grano se explican principalmente por las modificaciones en la tasa de crecimiento del grano en la etapa de llenado de granos provocadas por las deficiencias hídricas. En tal sentido, Maturano (2002) menciona que la duración efectiva de la etapa de llenado de los granos es el cociente entre el peso final del grano y la tasa de crecimiento de los granos durante la etapa lineal de acumulación de peso. Por lo tanto, en este sentido, podríamos reafirmar el concepto de que disminuciones en la tasa de

crecimiento en esta etapa podría resultar en disminuciones en el peso de mil granos (PMG).

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

En el cultivo de maíz, el rendimiento final depende del NG que se desarrolle y del tamaño final o PMG (Fassio et al., 1998). Sin embargo, los efectos del déficit hídrico en el rendimiento varían en función de la etapa de desarrollo del cultivo en la cual ocurren (Ober et al., 1991). Las reducciones en rendimientos de grano resultarán mayores por efecto de estrés hídrico entre dos semanas antes y dos semanas después de R1 que en cualquier otro período de crecimiento. No obstante, aunque no tan severo como en R1, deficiencias en R3 pueden tener un efecto profundo en el rendimiento reduciendo ambos componentes de rendimiento. Aun así, el rendimiento en grano bajo condiciones de estrés está mayormente relacionado con el NG por planta que con el peso individual de los granos (Edmeades et al., 1993).

Según Boyer y Westgate (2004), la reproducción de las plantas es sensible al déficit hídrico, especialmente durante las primeras fases de desarrollo de la misma. Los autores manifiestan que el NG disminuye debido a varios cambios en el desarrollo, siendo en el maíz especialmente importante el aborto de los ovarios o la esterilidad del polen. En este sentido, Hall et al. (1981) sugieren que la esterilidad bajo condiciones de sequía se origina a partir de la escasez de polen o la desecación causada por más de 8 días de atraso en la floración femenina. Esto ha sido reafirmado por Namuco y O'Toole (1986), quienes mencionan que durante la formación de los gametos la planta es altamente sensible al déficit de agua; siendo el gametofito masculino la estructura más sensible, induciendo principalmente esterilidad. Por su parte, Avedaño et al. (2008), constataron, en experimentos realizados en México, que el retraso en ambas floraciones de maíz pudo haber provocado daños en la viabilidad del polen y en la receptividad de los estigmas.

La pérdida de granos es atribuible a la falta de fotosintatos, pero un gran NG no se desarrolla en plantas con deficiencia de agua, incluso cuando se aumenta el suministro de asimilados (Zinselmeier et al., 1995). Los granos ubicados en la región apical de la espiga son afectados en una mayor magnitud que los granos posicionados basalmente. En tal sentido se propuso la hipótesis de que el déficit hídrico durante el desarrollo temprano del endospermo podría inhibir crecimiento de los granos por la disminución de la división celular del endospermo, y que esta respuesta podría ser mediada por los cambios en los niveles de ácido abscísico (ABA) en el endospermo (Ober et al., 1991). Estos autores concluyen que cuando el estrés ocurre durante el desarrollo del cigoto se provoca aborto, o bien el saco embrionario puede ser afectado en su desarrollo, induciendo una asincronía entre la antesis y la floración femenina, lo que concuerda con las aseveraciones hechas sobre el tema por Moss y Downey (1971).

Otegui (1992), en ensayos realizados durante dos años en Balcarce, comparó un tratamiento con 40 días de sequía alrededor de la floración, con un testigo sin limitantes hídricas, y encontró una disminución cercana al 50% en la transpiración del cultivo, con la consecuente disminución de 17,7 kg ha⁻¹ de grano por mm de deficiencia. Por su parte, Gómez (1991) encontró relaciones similares entre rendimiento y deficiencias de agua alrededor de la floración, citando valores de alrededor de 20 kg ha⁻¹ de grano por mm de reducción en el agua consumida.

En cuanto al efecto de las deficiencias hídricas en el período de llenado de granos, Della Maggiora et al. (2000a) encontraron en experimentos realizados en Balcarce que las deficiencias hídricas durante esta etapa produjeron una reducción significativa en el PMG (26%), que explicó la disminución del rendimiento (29%), de acuerdo con lo obtenido por otros autores (Eck 1986, Grant et al. 1989). Según Rhoads y Bennett (1990) esta disminución en el rendimiento podría deberse a un aumento de la senescencia y acortamiento del período de llenado. Por su parte, Moser et al. (2005) proponen que el bajo PMG debido a la sequía, que encontraron en sus experimentos realizados en Tailandia, puede indicar que las plantas eran incapaces de satisfacer plenamente la demanda de los granos en crecimiento. Dado que las consecuencias a largo plazo de déficit hídrico pre-antesis incluyen un menor número de hojas, un área de la hoja más pequeña, y entrenudos más cortos (Hall et al. 1981, NeSmith y Ritchie 1992), el estrés por sequía temprana probablemente ha reducido la capacidad de producción y/o almacenamiento de asimilados durante el llenado del grano. Sin embargo, el déficit hídrico pre-antesis también puede haber afectado el tamaño de los granos de una manera diferente (Moser et al., 2005). La capacidad de los granos de maíz para almacenar asimilados es una función del número de células del endospermo y los gránulos de almidón establecidos durante los primeros 10 a 14 días después de la polinización (Commuri y Jones, 2001).

En coincidencia con lo anterior, NeSmith y Ritchie (1992) encontraron, en plantas de maíz, una reducción de la biomasa y rendimiento entre 21 y 40% por efecto de la sequía, siendo el PMG la variable más afectada, ya que se acortó en ocho días el periodo de llenado del mismo, debido, según Westgate (1994), a un secado prematuro del endospermo y a un volumen limitado del embrión.

Por su parte, Rivetti (2006) menciona datos de ensayos realizados en Córdoba, donde encontró disminuciones en el PMG cuando el cultivo estuvo bajo condiciones de déficit hídrico durante el crecimiento reproductivo y en algunas fases del crecimiento vegetativo, resultados similares fueron obtenidos en ensayos por Pandey et al. (2000). Así mismo, Karam et al. (2003) reportaron disminuciones del rendimiento de maíz de 37% bajo condiciones de estrés hídrico, debido a la pérdida del PMG en 18%.

2.6. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA

2.6.1. Requerimientos hídricos

La cantidad de agua necesaria para compensar la pérdida por ETc es equivalente a la necesidad de agua de los cultivos (Ali, 2010). Sin embargo, los requerimientos de agua varían entre cultivares, a lo largo de la estación de crecimiento y entre ambientes (Della Maggiora et al., 2000b). Según afirman los mismos autores, su conocimiento es útil para decidir prácticas de manejo que permitan lograr la mayor coincidencia entre la oferta natural de agua y demanda del cultivo, así como para definir la necesidad de riego.

Según Pereira y Alves (2005), las necesidades de agua de los cultivos son variables y corresponden a la evapotranspiración que presentan en el ambiente en el que se desarrollan y a la aplicación de la tecnología utilizada en cada situación productiva. En este sentido, Gardner et al. (1985) mencionan que la ETc está influenciada por la radiación, la humedad relativa, la temperatura y la velocidad del viento, variables meteorológicas que determinan la demanda evaporativa atmosférica y afectan la cantidad de agua que el cultivo puede absorber para distintas condiciones de humedad edáfica, estado de crecimiento y cobertura vegetal. Por otro lado, la ETc es también afectada por las características del cultivo, además de las características de clima y suelo, por lo que la misma se debe medir para cada región y cultivo en particular (Della Maggiora et al., 2000a).

Las características del cultivo se pueden cuantificar con un coeficiente de cultivo (Kc) y las del clima por la evapotranspiración de referencia (ETo), multiplicando ambos términos se puede obtener el requerimiento de agua del cultivo como $ETc = ETo * Kc$ (Doorenbos y Pruitt, 1977).

Della Maggiora et al. (2000a) encontraron, en experimentos realizados en Balcarce, la existencia de variación entre años en los valores de ETc de los cultivos, asociada con las condiciones meteorológicas que afectan tanto las tasas de crecimiento y desarrollo vegetal como la demanda atmosférica. Por otra parte, los autores también concluyeron, a través de dichos experimentos, que el maíz presentó bajas tasas iniciales de ETc (comparado a otros cultivos), por ser erectófilo y emerger más temprano en la primavera, llegando a los máximos poco antes del estado VT; manteniendo dichos máximos mientras la intercepción de la radiación fotosintéticamente activa (IRFA) estuvo por encima del 90%.

Las necesidades hídricas del cultivo se incrementan progresivamente desde emergencia hasta el estadio de 9 - 10 hojas, para llegar al máximo de necesidades diarias

desde este estadio hasta R1. De aquí en adelante van decreciendo gradualmente hasta madurez fisiológica (Rivetti, 2006).

2.6.2. Consumo hídrico

El consumo de agua de los cultivos cuando el contenido de agua disponible en el suelo se encuentra por encima de un umbral crítico está determinado por una tasa de transpiración cercana a la que establece la demanda atmosférica (Dardanelli et al., 2003). En relación a este aspecto, se ha demostrado que la acumulación de biomasa está relacionada linealmente con la transpiración acumulada (Tanner y Sinclair, 1983). En el caso de que el contenido de agua esté por debajo de dicho umbral, la tasa de transpiración está dada por la capacidad del cultivo para absorber agua del suelo (Dardanelli et al., 2003).

El maíz requiere transpirar entre 450-600 mm de agua durante su estación de crecimiento y se producen aproximadamente 20 kg ha⁻¹ de grano por cada mm de agua transpirado (Fassio et al., 1998). Waddington et al. (1994) encontraron valores similares y sostienen que se requiere, 1 mm de agua para producir 16 kg ha⁻¹ de grano. Por su parte, Doorenbos y Pruitt (1977) proponen que el maíz evapotranspira entre 400 y 700 mm en la totalidad de su ciclo, según condiciones ecológicas y afirman que el rendimiento de maíz depende de la cantidad de agua disponible para evapotranspirar.

En ensayos realizados en Manfredi, provincia de Córdoba, Martellotto et al. (1999) determinaron los consumos de agua para maíz en tres ciclos agrícolas, encontrando valores similares con lo citado por otros autores, variando entre 566 mm y 759 mm con producciones entre 7300 y 10000 kg ha⁻¹. Rosenthal et al. (1977) encontraron un valor de máxima evapotranspiración para maíz en Kansas de 620 mm en todo el ciclo.

Según Stone et al. (1996), en cultivos de maíz sin riego en el altiplano de Kansas, se midieron consumos de agua en torno a 351 mm en todo el ciclo. A través de estos resultados se puede concluir el efecto de las deficiencias hídricas durante el ciclo de cultivo en la disminución de la evapotranspiración, si contrastamos con resultados de consumos potenciales de agua en cultivos regados, citados por distintos autores.

En Uruguay generalmente las precipitaciones ocurridas durante la estación de crecimiento del cultivo, más el agua acumulada en el suelo, en general no alcanzan la cantidad necesaria para cubrir dichos requerimientos del cultivo (Fassio et al., 1998), siendo mayormente negativos los balances hídricos de los suelos en los meses de diciembre, enero y febrero (Corsi, 1982).

Giménez (2012a) encontró, a través de experimentos en los que se evaluó el efecto de las deficiencias hídricas en maíz, que la etapa de desarrollo del ciclo en que el consumo de agua fue más elevado se ubicó en el entorno de la floración; y el consumo de agua fue de 38 a 40% del total. Dichos autores afirman que este alto consumo durante el periodo crítico (PC) se debió a que el mismo ocurrió temporalmente durante los meses de mayor demanda atmosférica (diciembre y enero) y el cultivo se encontraba totalmente desarrollado. Por lo tanto, determinan que el PC es una etapa cualitativamente importante en relación al agua disponible para el cultivo, y cuantitativamente significativa, en relación al consumo en el ciclo del maíz. En el mismo trabajo también se cuantificó que el llenado de grano es la etapa que continúa al PC en consumo de agua, no obstante se ubicó temporalmente en meses con menor demanda atmosférica (febrero-marzo), pero la longitud de esta etapa es la mayor en el ciclo y esto justifica el consumo.

En un estudio de la evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay (Salto y Colonia), Giménez y García Petillo (2011) encontraron que las estimaciones de las ETr fueron sustancialmente menores que las ETc en la mayoría de las situaciones agro-climáticas planteadas y con una variabilidad entre años superior. Asimismo, se destacan los años “Niña” y “Niño” con los menores y mayores valores de ETr respectivamente.

2.6.3. Eficiencia en el uso del agua

La eficiencia en el uso del agua (EUA) se define como la cantidad de biomasa producida por unidad de agua consumida y expresa la eficiencia con la cual un órgano o un cultivo fijan carbono en relación al agua que se pierde (Dardanelli et al., 2003). Aunque el valor de EUA es fácil de determinar, el resultado es un indicador complejo, lo que puede ser atribuido principalmente a prácticas de manejo (régimen hídrico, suministro mineral y la calidad del agua), factores de las plantas (especies, variedades y sensibilidad de la etapa de crecimiento al estrés), y el medio ambiente (el clima, la textura del suelo, Katerji, 2013). Carlesso (2010) con respecto a esto afirma que cuando las necesidades hídricas de los cultivos son suplementadas a través del riego, la discusión respecto a la ineficiencia o baja eficiencia del uso del agua debe envolver, necesariamente, aspectos agronómicos, además de los aspectos ambientales.

Según Huang et al. (2006) la EUA del maíz es aproximadamente el doble que la de cultivos C3 cultivadas en los mismos sitios. La elevada EUA de dicho cultivo comparada con otros cultivos de verano se debe principalmente a su metabolismo C4, que le confiere alta capacidad de fijación de dióxido de carbono por unidad de agua transpirada y al bajo contenido energético de la biomasa reproductiva (Andrade y Gardiol, 1994).

La alta dependencia de la EUA de la condición climática y del manejo del cultivo, provoca que en la bibliografía se encuentre un amplio rango de EUA, medida como kilogramos de biomasa producida por cada mm de agua transpirada, para cultivos con adecuada disponibilidad de agua (Della Maggiora et al., 2000a). Para maíz se citan valores desde 10-12 kg ha⁻¹ mm⁻¹ (Eck et al., 1986), hasta 24 kg ha⁻¹ mm⁻¹ (Steele et al., 1994) con valores intermedios de 17 kg ha⁻¹ mm⁻¹ (Hattendorf et al., 1988).

A su vez, la EUA puede verse afectada por estrés que se presenten durante el desarrollo del cultivo, cuyo efecto sobre la misma es dependiente del estado fenológico del cultivo al momento en el que el estrés se presente (Roselli y Texeira, 1998). En tal sentido, Eck et al. (1986) encontraron que en los tratamientos bajo estrés en período vegetativo y maduración de granos no hubo efectos sobre la EUA. Por otro lado, Downey (1971) encontró diferentes EUA para estrés temprano (meiosis masculina) y estrés tardío (llenado de grano), respecto a plantas que no sufrieron déficit hídrico.

Karam et al. (2003) citan datos obtenidos en ensayos con riego en Líbano, en los cuales encontraron que la EUA aumentó significativamente en el tratamiento con déficit hídrico. De hecho, para estos mismos ensayos, cuando se evaluaron durante todo el período de crecimiento, las plantas bajo estrés tuvieron mayores EUA con respecto a las plantas en bienestar hídrico. Los autores sostienen que dicho aumento en la eficiencia se debe a un mayor descenso en la transpiración de las plantas, debido a la reducida área foliar verde como consecuencia de la escasez de agua. Resultados similares fueron hallados por Tolk et al. (1998) en ensayos realizados en Texas.

Por su parte, Hatlitligil et al. (1984) encontraron, en ensayos realizados en Nebraska, una tendencia general de aumento de la EUA a medida que el suministro de agua de riego en sus ensayos era menor. Sin embargo, Rivetti (2006) mediante la realización de ensayos en Córdoba, con el objetivo de evaluar la producción del maíz bajos distintos niveles de riego complementario, encontró que no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos en cuanto a EUA, aunque el valor más alto correspondió al tratamiento sin riego.

2.7. RIEGO

El riego suplementario es una herramienta que puede ayudar a aumentar la productividad y fundamentalmente a estabilizar los rendimientos, lo cual le da mayor certidumbre al negocio agrícola (Vallone et al., 2003), adicionalmente, es una técnica que produce un impacto significativo en la producción al potenciar los beneficios del resto de las prácticas tecnológicas implementadas (Pérez y Peña, 2013).

El Uruguay se caracteriza por presentar un clima de alta variabilidad con períodos de déficit hídrico a veces muy importantes durante los meses de verano (Sawchik y Formoso, 2000). Esto se debe a la escasa capacidad de almacenamiento de agua de los suelos (Molfino y Califra, 2001), a las demandas atmosféricas elevadas del verano (Baethgen y Terra, 2010), y a la irregularidad de las precipitaciones, que generalmente no cubren las necesidades de los cultivos (Giménez, 2012a). Esto trae como consecuencia una gran variación en los rendimientos del maíz (Sawchik y Formoso, 2000).

En los cultivos de verano realizados en secano, la limitante principal de los ambientes de producción en primavera y verano es la disponibilidad hídrica, que es por ende la determinante principal del rendimiento. Cuando la disponibilidad de agua no se adecua a los requerimientos de los cultivos en las diferentes etapas de desarrollo, los rendimientos disminuyen su potencial (Giménez, 2012b). En tal sentido, Giménez (2012a) afirma que el riego es la tecnología que permite levantar dicha limitante ambiental para la producción de maíz. Por consiguiente, la incorporación de riego a las plantaciones de maíz genera una estabilidad importante de la producción, obteniéndose a su vez mayores rendimientos físicos (Giménez y Mosco, 1996). Por medio de la incorporación de riego en los momentos adecuados y en cantidades satisfactorias, es posible duplicar los rendimientos en secano, logrando superar los 10.000 kg ha⁻¹ (Debórtoli 2005, Piedrabuena 2010, Pérez y Peña 2013).

De acuerdo a lo mencionado, la estabilidad de producción de los cultivos regados supera ampliamente a la obtenida en secano. Debórtoli et al. (2005) mencionan que los cultivos regados presentan una variación entre años respecto al promedio que no alcanza el 10%. Por otra parte, los cultivos de secano, a pesar de la mejora tecnológica, presentan una variación entre años del 35% (Cardellino y García, 1995).

Por su parte, Cardellino y Baethgen (2000), afirman que mediante el empleo de técnicas de manejo de suelos y cultivos y el uso de materiales genéticos tolerantes a la sequía es posible mitigar los efectos de las deficiencias de agua sobre la producción del maíz, pero aun así los promedios de producción así como su estabilidad son menores a los obtenidos en cultivos con riego. Sin embargo, Maturano (2002) menciona que una correcta incorporación y programación de la práctica del riego implica el conocimiento de la disponibilidad de agua (calidad y cantidad), del cultivo (momentos de mayor respuesta a la aplicación del riego), del suelo (capacidad de retención de agua, características físico-químicas para poder evaluar un potencial riesgo de degradación, etc) y del clima. La correcta programación de riego permitirá optimizar el aprovechamiento del agua aportada por las precipitaciones (Maturano, 2002).

La utilización del agua de riego en forma eficiente implica el conocimiento de los períodos de mayor respuesta a la aplicación del mismo y los umbrales de riego en cada etapa de desarrollo del cultivo (Maturano, 2002). La conducción del riego se refiere

a la aplicación correcta en tiempo y cantidad del agua para lograr el objetivo propuesto (Heermann et al., 1990).

Los requerimientos de riego de los cultivos varían, temporal y espacialmente, en función del clima, del manejo, de la fase y de la variedad del cultivo, por lo que su cálculo debe ser local (Doorenbos y Pruitt, 1977). En relación con esto, Pérez y Peña (2013) concluyen que la implantación de un programa de uso eficiente del riego requiere certidumbre del cálculo de los requerimientos de riego.

2.7.1. Riego suplementario total

Puiatti et al. (1985), a través de ensayos realizados en Río Cuarto (Argentina), indican que la respuesta del cultivo al riego complementario es altamente significativa, Rivetti (2004) obtuvo producciones de 34,6 t ha⁻¹ de MS cuando se regó el cultivo durante todo el ciclo, mientras que en secano la disminución en el rendimiento de MS fue del 70%. Sáenz et al. (2008) encontraron en Argentina, al comparar tratamientos bajo riego y en secano en dos años, que durante el primer año los tratamientos de riego fueron superiores como respuesta a un año seco, con una participación muy importante de tratamientos con riego sin limitación de disponibilidad de agua por parte de la planta entre los de mayor rendimiento. En cambio en el segundo año los rendimientos más elevados se obtuvieron en tratamientos con 50% de riego, según estos autores probablemente el riego suplementario total sea excesivo en años húmedos.

Pérez y Peña (2013), mediante ensayos llevados a cabo en la provincia de Las Tunas (Cuba), encontraron que el cultivo tiene una notable respuesta a las variaciones en el intervalo de riego, con resultados satisfactorios tanto en su desarrollo biológico como en el rendimiento final cuando se logra mantener una humedad adecuada durante todo el ciclo hasta después de la formación del grano. Estos autores concluyeron sobre el efecto beneficioso que tuvo la aplicación de riego sobre los componentes de rendimiento, y en este sentido señalan que los mejores valores se obtuvieron en el tratamiento con riego durante todo el ciclo del cultivo.

En ensayos realizados por Giménez et al. (2014) en Paysandú, observaron que en el tratamiento sin deficiencias hídricas regado durante todo el ciclo el rendimiento varió entre 13 y 15 t ha⁻¹ aproximadamente, siendo el mayor valor obtenido en comparación con los demás tratamientos del ensayo. En tal sentido, los autores aseveran que la información obtenida confirmó que los rendimientos en grano en maíz con riego durante todo el ciclo son elevados, concordando con lo citado anteriormente por distintos autores.

Los altos rendimientos encontrados por Giménez et al. (2014) en el tratamiento con bienestar hídrico durante todo el ciclo se deben principalmente a la obtención de un

elevado NG por superficie. Los autores afirman que estos resultados, se explicaron debido a que en dicho tratamiento, durante el entorno de la floración (PC de determinación del rendimiento), no se presentaron deficiencias hídricas, y en ésta etapa es en la que se determina el NG. Además, los autores señalan que en dicho tratamiento el PMG también mostró valores elevados.

López Fuster (2000) ha informado sobre rendimientos de $12,6 \text{ t ha}^{-1}$, obtenidos en el cultivo de maíz en Albacete (España), con riego suplementario durante todo el ciclo de cultivo, siendo este valor significativamente mayor a los logrados tanto en riego deficitario, como en secano. Por su parte, Rivetti (2006) encontró resultados similares en ensayos realizados en Córdoba, este autor menciona que en el tratamiento con riego suplementario durante todo el ciclo del cultivo el rendimiento fue 78 % superior respecto al secano, debiéndose a un mayor NG y PMG. En cuanto al PMG, el autor señala que el mayor valor obtenido en el tratamiento sin deficiencias hídricas se debe a que la duración de la etapa de llenado y la tasa de llenado de granos fue significativamente mayor con respecto al tratamiento de secano.

Maturano (2002) cita que en ensayos realizados en maíz con distintos niveles hídricos en Pergamino (Argentina), los tratamientos con mayor disponibilidad hídrica en la etapa de llenado de granos tuvieron una mayor tasa de llenado y además la duración de la etapa también fue mayor con respecto a los tratamientos con menor disponibilidad hídrica. En acuerdo con lo antedicho, Westgate y Thomson Grant (1989) sostienen que los estados hídricos limitantes para el grano pueden acortar la etapa de llenado de grano.

Se puede concluir acerca de las ventajas del riego durante todo el ciclo en maíz que en ausencia de otras limitantes puede asegurar altos rendimientos, a través de la obtención de un NG y PMG elevado.

2.7.2. Riego deficitario

En los últimos años ha habido un interés creciente en el estudio de la programación del riego con el objetivo de conservar y racionalizar el agua en la agricultura (Maturano, 2002). Esto junto a la búsqueda de sistemas más eficientes de gestión agronómica de los cultivos han sido elementos básicos en el desarrollo de lo que denominamos riego deficitario controlado (RDC, Girona et al., 2014). Farré (1998) en este sentido asevera que el estudio de la respuesta de los cultivos al riego deficitario es necesario para optimizar el uso de agua en aquellas regiones donde es un recurso escaso.

El RDC se basa en gestionar los niveles de déficit hídrico al que sometemos al cultivo a lo largo de su ciclo productivo atendiendo a la sensibilidad de la planta al déficit hídrico (intensidad y duración) en cada una de las fases de su ciclo (Girona et al., 2014). Por consiguiente, la diferencia básica entre RDC y riego completo es precisamente que con el RDC se propone que la planta esté sujeta a limitaciones de agua en un período determinado y controlado de su ciclo (Girona et al., 2014). Sin embargo, el elemento más novedoso del RDC es que parece romper con la idea preestablecida de que la máxima producción se obtiene con la utilización, por parte de la planta, del máximo volumen de agua que ésta sea capaz de transpirar (Girona et al., 2014). Esta visión muy fundamentada hace unos años (Vaux y Pruitt, 1983) y en muchos casos se encuentra aún vigente.

La elevada sensibilidad del maíz al estrés hídrico, conlleva a que bajo condiciones hídricas limitantes, sea difícil implementar estrategias de manejo de riego sin incurrir en pérdidas significativas de rendimiento (Rhoads y Bennet, 1990). En tal sentido, Fereres y Soriano (2006) mencionan que este tipo de deficiencias hídricas en algunos casos podría resultar en ahorros de agua, mediante la reducción en el uso de riego por un pequeño costo en el rendimiento. Por lo tanto, es importante saber la respuesta del cultivo al déficit hídrico moderado en las diferentes fases de crecimiento (Farré y Faci, 2009). Por consiguiente, para diseñar una estrategia de déficit hídrico debemos conocer el ciclo anual del cultivo, y analizar como diferentes niveles de estrés hídrico aplicados en distintos momentos de su ciclo anual afectarían a nuestro objetivo productivo (Girona et al., 2014).

El efecto de la distribución del estrés hídrico en el rendimiento del maíz ha sido evaluado por diversos autores (Stegman 1982, Cakir 2004). La floración ha sido citada como la fase más sensible al déficit hídrico, con reducciones en biomasa, rendimiento e índice de cosecha (NeSmith y Ritchie 1992, Pandey et al. 2000). Así mismo, ha sido confirmado que el maíz puede sobrevivir a estrés hídrico durante el crecimiento vegetativo, lo que hace al RDC una alternativa viable para dicha etapa (Klocke et al., 2015).

En ensayos realizados en los años 1995-1996 en Zaragoza (España) para estudiar el efecto del riego deficitario en las distintas fases de crecimiento del maíz, Farré y Faci (2009) encontraron que para dos años distintos, la biomasa aérea del cultivo no se vio afectada en ambos años cuando se aplicó riego deficitario desde la etapa de grano lechoso hasta madurez fisiológica. Por otro lado, los autores señalan que el rendimiento en grano fue reducido significativamente con riego deficitario desde la etapa de emergencia de los estigmas hasta la etapa de grano lechoso. Por lo general, dicha reducción en el rendimiento fue principalmente debida a un menor NG m⁻² (Farré y Faci, 2009). En cambio, Farré (1998) menciona que el crecimiento y el rendimiento en grano no se vieron significativamente afectados con riego deficitario durante la fase de llenado de granos.

Aydinsakir et al. (2013) encontraron resultados similares en ensayos sobre la respuesta de distintos genotipos de maíz al riego deficitario en Turquía, dichos autores mencionan reducciones de rendimiento a medida que el agua de riego fue reducida en los distintos tratamientos del ensayo, llegando incluso a una reducción del 81 % respecto al tratamiento de riego total. Resultados similares fueron mencionados por López Fuster (2000), quien obtuvo rendimientos cercanos a las 7 t ha⁻¹ con riego deficitario en ensayos realizados en España, cifra sensiblemente menor a las 12,6 t ha⁻¹ que fueron obtenidas con riego total en el mismo ensayo.

Saseendran et al. (2008) modelaron la producción de maíz con riego deficitario en el noreste de Colorado (Estados Unidos) y concluyeron que los rendimientos y la EUA fueron maximizados cuando la cantidad de riego disponible se dividió en un 20 % aplicado durante la etapa de crecimiento vegetativo y un 80 % durante la etapa de crecimiento reproductivo.

En referencia a la EUA, Farré y Faci (2009) obtuvieron que la misma fue significativamente mayor en tratamientos con riego total alrededor de la floración, respecto a otros los tratamientos con RDC. Estos resultados son de gran importancia y según dichos autores indican que, bajo condiciones de déficit hídrico, el maíz bajo riego total alrededor de la floración fue capaz de producir más rendimiento en grano por unidad de agua de riego aplicada que el maíz sujeto a RDC en torno a la floración. Esto tiene importantes implicaciones económicas, ya que significa que bajo condiciones limitadas de agua, el maíz irrigado completamente alrededor de la floración puede producir más rendimiento por unidad monetaria invertida en el agua de riego respecto a cultivos sujetos a RDC en torno a la floración (Farré y Faci, 2009). En este sentido, Benjamin et al. (2015) señalan que para que el RDC sea exitoso no debe haber una disminución seria en la EUA con respecto al riego total.

Trooien et al. (1999) encontraron un aumento en la EUA para el grano de maíz usando riego deficitario en comparación con riego total en el centro de Kansas, resultados similares fueron citados por Klocke et al. (2015) en Nebraska.

El riego deficitario es una estrategia de riego que para su aplicación en la práctica debería integrarse y complementarse con una adecuada tecnología de cultivo que pudiesen proporcionar todas las ventajas que potencialmente presenta el RDC (Girona et al., 2014).

2.7.3. Riego en distintas etapas

En la utilización de la técnica de riego, uno de los interrogantes más importantes es el referido al momento y a la cantidad de agua a aplicar en cada riego con el objetivo de lograr el máximo rendimiento económico y con la mayor eficiencia en el uso del agua (Maturano, 2002). Para una correcta programación del riego es necesario conocer la respuesta del cultivo al momento, frecuencia y láminas de riego en interacción con el ambiente estudiado (Maturano, 2002). Por lo tanto, asegurar una humedad adecuada en la zona de raíces durante las etapas críticas es esencial para obtener rendimientos óptimos (Ojeda et al., 2006). Las etapas más críticas del maíz, desde el punto de vista hídrico, son durante la floración y el desarrollo temprano de la mazorca (Shaw y Newman, 1987).

La implantación de un programa de uso eficiente del riego requiere certidumbre del cálculo de los requerimientos de riego en las distintas etapas fenológicas del cultivo (Ojeda et al., 2006). En este sentido, Rivetti (2007) señala que la producción del cultivo de maíz depende de la cantidad de agua disponible para evapotranspirar, requiriendo entre 400 y 700 mm en su ciclo, según condiciones ecológicas. El consumo promedio de agua para todo el ciclo, según el balance hídrico, estuvo en el orden de los 575 mm para la región de Río Cuarto, correspondiendo 227 mm al PC del cultivo (Rivetti, 2007). Por otro lado, el mismo autor observó que la cantidad de materia seca fue sensiblemente menor en secano, y también fue menor cuando se regó sólo en el PC, comparando con el tratamiento con riego total durante todo el ciclo. Por otra parte, el autor señala que cuando se disminuyó el riego en las etapas vegetativas y llenado de granos, no se observaron diferencias significativas en la MS, pero sí se manifestó una disminución del 15 % cuando sólo se regó en el PC, respecto al riego en todo el ciclo.

Por su parte, Giménez et al. (2014) investigaron el efecto de las deficiencias hídricas en las distintas etapas del ciclo fenológico del maíz, y constataron que las mayores disminuciones del rendimiento se produjeron cuando las deficiencias hídricas fueron provocadas, en el PC y cuando se acumularon en la etapa vegetativa y el PC. Asimismo, se cuantificó que la disminución del rendimiento con deficiencias en el PC en relación al bienestar hídrico varió entre 6,1 y 7,7 t ha⁻¹ aproximadamente, esto implicó mermas de los rendimientos de 40 a 53 %. En el caso de las deficiencias hídricas acumuladas en la etapa vegetativa y el PC, se obtuvieron pérdidas de rendimiento que variaron entre 6,8 y 8,6 t ha⁻¹, implicando disminuciones de 44 a 56 %. De los resultados

se deduce que las deficiencias hídricas en las etapas vegetativas, implicaron escasas pérdidas adicionales de rendimiento (4 a 6 %) en relación a las ocurridas sólo durante el PC (Giménez et al., 2014), por lo que el riego en dichas etapas es de menor relevancia, en cuanto a las respuestas en el rendimiento.

En el mismo ensayo mencionado anteriormente, Giménez et al. (2014) constataron que las deficiencias hídricas provocadas por la ausencia de riego en la etapa de llenado de granos mostraron menores efectos sobre los rendimientos que las provocadas en el PC, no obstante las pérdidas en grano con deficiencias durante el llenado de grano variaron entre 3,5 y 4,5 t ha⁻¹ aproximadamente, implicando pérdidas porcentuales de 23 a 31 %.

2.7.4. Distintas estrategias de riego

Las estrategias de riego son los criterios que se adoptan para decidir de antemano el momento oportuno de efectuar el riego, así como de la cantidad de agua a aplicar (Mendoza, 2013).

En general, los métodos de programación de riego pueden ser clasificados como métodos basados en la planta, en el suelo y en el clima, o combinaciones (Martin et al., citados por Steele et al., 1994). Los métodos basados en el suelo típicamente miden o infieren el nivel de agua en el suelo o el potencial matriz de la misma. El contenido de agua es medido tanto directa o indirectamente, a través de métodos como medida gravitacional, sonda de neutrones, entre otros (Phene et al., 1990).

Por otra parte, Steele et al. (1994) mencionan que los métodos de programación de riego basados en el clima típicamente utilizan parámetros climatológicos para estimar la evapotranspiración potencial para cultivos bien regados y usan curvas de coeficientes del cultivo específicas de cada sitio para una mayor precisión en la estimación del uso de agua por el cultivo.

La lámina de riego y el momento de aplicación de riego son los factores más importantes a determinar en la planificación de riego (Roselli y Texeira, 1998). Según dichos autores, un elemento que determina la lámina de riego a agregar es el umbral hasta el cual se permite descender el nivel de agua en el suelo, sin que se vea afectado el crecimiento del cultivo, o factor de agotamiento (p), ya que determinará el nivel de agua necesario para elevar el contenido de humedad el suelo hasta capacidad de campo (CC). Aunque se citan distintos valores del factor “p” en la bibliografía, el valor comúnmente utilizado es de 0,50. En tal sentido Aldrich y Leng (1974) encontraron que el maíz presenta las máximas tasas de crecimiento cuando el nivel de agua en el suelo se encuentra 50 a 100 % de la CC. Según estos autores, cabe aclarar que “p” puede variar

en función de las condiciones edáficas y climáticas en las que se desarrolla el cultivo, teniendo en cuenta la estrategia de riego planteada.

2.7.4.1. Lámina de reposición de riego

La lámina de reposición de riego representa el espesor de la lámina de agua que ha sido consumida desde el riego anterior. El agua que debe reponerse se expresa generalmente como un porcentaje del agua aprovechable (Blair, 1979). Dependiendo del objetivo planteado, en esta estrategia se deja que el agua disminuya hasta 40 – 60 % (para la mayoría de los cultivos) del agua que se encuentra entre la CC y el punto de marchitez permanente (agua disponible). Este porcentaje se conoce con el nombre de porcentaje de agotamiento (Mendoza, 2013). Los valores de agotamiento por debajo del 100 % significan que el riego se llevará a cabo antes de que el agua disponible haya sido completamente agotada.

En un estudio sobre las distintas estrategias de programación de riego realizado en Dakota del Norte, Steele et al. (1994) encontraron que en el tratamiento en el cual se dejó descender el nivel de agua un 40% por debajo de CC, se obtuvieron las mayores ET y los mayores rendimientos del cultivo; siendo también el tratamiento con mayor cantidad de agua aplicada durante todo el ciclo. Stegman (1982) obtuvo resultados similares y además comparó dichos resultados con un tratamiento de riego por goteo, el cual mantuvo cercano a cero el potencial matriz del suelo. No observando diferencias significativas en cuanto a rendimiento cuando se dejó descender el nivel de agua hasta un 30 – 40 % por debajo de CC.

El porcentaje de agua que se deja descender por debajo de CC debe ser distinto para las diferentes etapas del cultivo, para que los rendimientos obtenidos no se vean afectados en gran magnitud. Stegman (1982) indica que reducciones de rendimiento menores al 5% de los niveles potenciales probablemente ocurran si el agotamiento de agua disponible en la zona de la raíz está limitado a: 60 a 70 % en el período vegetativo temprano (asume la humedad en capacidad de campo cercano a la siembra), 30 a 40 % en el período comprendido entre 12 hojas hasta fijado de granos, y 50 a 60 % en el período de llenado del grano tardío.

Según Phene et al. (1990) la utilización de este método requiere conocer cuál es la capacidad de disponibilidad hídrica del suelo, que combina el conocimiento de los límites inferior y superior para cada horizonte y la profundización y exploración de las raíces en el perfil, lo que hace necesario definir criterios de umbrales de consumo del agua disponible para cada tipo de suelo y para el cultivo en particular.

2.7.4.2. Riego en agotamiento fijo

Se trata de una herramienta de manejo útil cuando se va a aplicar una lámina de riego constante en cada riego no importando el intervalo entre los riegos (intervalo variable).

Esta estrategia es la más conveniente desde el punto de vista del desarrollo óptimo del cultivo, pues el agua se aplica en las cantidades que puede almacenar el suelo y de acuerdo al consumo de la planta. No obstante, presenta el inconveniente que es necesario llevar un control de los niveles de humedad del suelo a fin de establecer con exactitud el momento del riego. Por otro lado esta estrategia lleva a manejar intervalos de riego variables, ya que la velocidad de consumo de agua por la planta como se ha dicho, varía de acuerdo a la edad (Mendoza, 2013).

2.7.4.3. Riego basado en la demanda atmosférica

Las ventajas potenciales de la programación de riego utilizando datos climáticos se han defendido por muchos investigadores. Ali (2010) señala que en esta estrategia de riego el agua se aplica en una cantidad igual a la ET, o una fracción o múltiplos de la misma.

Somehalder (1962) concluyó, a través de estudios realizados en Nebraska, que los requerimientos de agua de riego podían ser disminuidos sustancialmente por debajo de la ET potencial estimada, sin reducir los rendimientos apreciablemente.

Fischbach y Somerhalder (1974) aplicaron cantidades de agua equivalentes al pico máximo diario de ET (7,52 mm / día) y 0,75, 0,50, y 0,33 del pico diario en las frecuencias de 1,5 a 7 días, e informaron que la cantidad de agua equivalente a 0,5 de la máxima tasa de ET resultó en el mayor rendimiento para todas las frecuencias probadas. Por su parte, Steele et al. (1994) obtuvieron una reducción de 13 % de rendimiento en comparación al rendimiento máximo obtenido en sus experimentos y una reducción de 44 % en la aplicación de agua de riego, cuando la cantidad de agua aplicada fue equivalente a 0,5 de la ET potencial.

Hill y Guron (1973) aplicaron la cantidad de agua equivalente a 1,2, 1,1, 0,75, 0,50, 0,40 de la ET potencial de maíz a intervalos fijos y obtuvieron mayores rendimientos con el aumento de cantidad de agua.

Por su parte, El-Hendawy et al. (2008) estudiaron el efecto de distintos regímenes de riego (1,0; 0,80 y 0,60 de la ET) sobre los componentes del rendimiento del cultivo de maíz. Dichos autores encontraron que tanto el NG como el peso de los mismos no se vieron afectados por el tratamiento de 0,80 de ET, pero en cambio el tratamiento de 0,60 de ET produjo los menores valores de ambas variables medidas.

La estrategia de aplicar agua de riego en cantidades menores a ET afecta de distinta manera el rendimiento y la EUA, dependiendo de la etapa del cultivo en que se utilice. Por lo tanto, esta estrategia debería limitarse a etapas tempranas de crecimiento durante la fase vegetativa, muy por delante de la floración, visto que un riego muy por debajo de la ET máxima durante el PC aumentaría el riesgo de una disminución significativa de rendimiento (Musik y Dusek, 1978).

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 suelo del campo experimental está clasificado como un Brunosol subéutrico 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
Total	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 el 27 de octubre de 2014 con el objetivo de obtener una densidad de 100.000 pl ha⁻¹, la que se logró ajustadamente. 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 de producto comercial. Se fertilizó a razón de 300 kg/ha de nitrógeno en dos fraccionamientos iguales en los estadios V6 y V10, utilizando como fuente urea (46-0-0).

3.2.1. Tratamientos

Los tratamientos estudiados fueron los siguientes:

- Bienestar hídrico (BH) durante todo el ciclo = BH
- BH durante el PC y deficiencias hídricas en el resto del ciclo = BH en PC
- BH durante el PC y etapa de llenado de granos y deficiencias hídricas durante la etapa vegetativa = BH en PC+LL
- Riego deficitario (RD) durante todo el ciclo (50 % de riego del BH) = RD

El BH fue considerado con contenidos de agua en suelo superiores a 60% de agua disponible (AD) durante el PC, es decir la etapa comprendida entre 15 días antes del inicio de la floración femenina y los 15 días posteriores a la misma. El BH en las etapas no críticas, se consideró con contenidos de agua superiores al 40% AD, se determinó a etapas no críticas a la etapa vegetativa y al llenado de granos. Las deficiencias hídricas fueron consideradas cuando los contenidos de agua en suelo variaron durante el PC entre 20 y 60% AD y en las etapas no críticas entre 20 y 40% AD.

Los umbrales hídricos definidos fueron establecidos a través de dos tipos de intervenciones en la disponibilidad hídrica: el riego suplementario y la intercepción de las PP (precipitaciones) en los tratamientos con deficiencias hídricas planificadas, esto se realizó mediante la utilización de simuladores de sequía. Se debe aclarar que en el tratamiento de BH en PC+LL se interceptó por error un evento de PP a los 84 días post emergencia, impidiendo el ingreso de agua al mismo, lo cual no estaba programado.

3.2.2. Simuladores de sequía

Los simuladores de sequía consistieron en estructuras de acero con dimensiones de 3,5 m de ancho, 5 m de largo y 2,5 m de altura, cubiertas por una lona impermeable y con el objetivo de impedir el ingreso de agua de lluvia a los tratamientos con deficiencias hídricas planificadas. Para evitar el ingreso de agua por escurrimiento las parcelas fueron rodeadas por una ronda construida en tierra con una altura de 0,2 m y a la vez se construyeron desagües entorno a las parcelas para desagotar el agua de lluvia proveniente de los techos de los simuladores.

3.2.3. Riego

El riego se realizó a través de un sistema de goteo con cintas ubicadas en cada surco y goteros distanciados a 0,2 m con un caudal de 1,49 l h⁻¹.

Por medio de un balance hídrico de suelos de paso diario simplificado, se estimó el contenido de AD del suelo de la siguiente forma $\Delta S = PP + R - E_{Tr}$, siendo ΔS la variación del AD (mm), R fue el riego (mm) y E_{Tr} fue la evapotranspiración del cultivo real (mm). Esta última también fue calculada diariamente de la siguiente manera $E_{Tr} = E_{To} \times K_c \times K_s$, siendo E_{To} la evapotranspiración del cultivo de referencia (mm), K_c el coeficiente del cultivo y el K_s el coeficiente de estrés hídrico. La E_{To} se estimó utilizando la ecuación de FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) y para K_c se utilizó un valor de 0,3 al comienzo del ciclo, aumentando progresivamente hasta alcanzar un valor de 1,2 al comienzo del PC, el cual se mantuvo constante durante la totalidad de dicha etapa. Posteriormente el valor de K_c disminuye hacia fin de ciclo. Dichos valores fueron propuestos por FAO (Allen et al., 1998) para maíz.

El coeficiente K_s utilizado fue el propuesto por FAO (Allen et al., 1998) en la siguiente ecuación $K_s = \frac{ADT - D_r}{(1-p) \times ADT}$, donde ADT es el agua disponible total en la zona radicular del suelo (mm), D_r 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. En este sentido cabe mencionar que los valores de p utilizados se ubicaron entre 0,4 y 0,6 dependiendo de la etapa en la cual se encontraba el cultivo. Las variables que determinan los valores de E_{To} 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 efectuó un muestreo de MS total, al momento de la cosecha del experimento, el día 6 de marzo. Se cosecharon 8 metros lineales de plantas en los surcos centrales, dejando un remanente de 5 cm respecto al suelo en cada una de las parcelas. Además, se registraron los siguientes datos: número de plantas, número de espigas por planta, espigas totales y peso fresco total de cada tratamiento.

En la etapa de laboratorio posterior se seleccionó al azar una planta por cada tratamiento (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 marcos. A su vez, se determinó el NG por hilera, las hileras por espiga, los granos por espiga, se midió la longitud de la espiga, el PMG y el porcentaje de humedad de los mismos.

3.4. DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO

3.4.1. Hipótesis biológicas

En maíz las disponibilidades hídricas iguales o superiores a 60% AD durante los PC de determinación del rendimiento y superiores o iguales a 40% AD en los PNC permiten obtener rendimientos potenciales para el ambiente de producción en el que se desarrolla. En el caso que estos contenidos de AD en suelo no sean logrados, los rendimientos obtenidos decrecen significativamente.

3.4.2. Diseño experimental

El diseño utilizado fue un DBCA (Diseño en bloques completos al azar), con tres bloques y cuatro tratamientos.

Modelo: $Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$

Y_{ij} : rendimiento en Kg ha^{-1} .

μ : media poblacional del rendimiento.

α_i : efecto del i -ésimo tratamiento.

β_j : efecto del j -ésimo bloque.

ϵ_{ij} : error experimental asociado al i -ésimo tratamiento en el j -ésimo bloque.

Siendo, i : 1, 2, 3, 4

j : 1, 2, 3

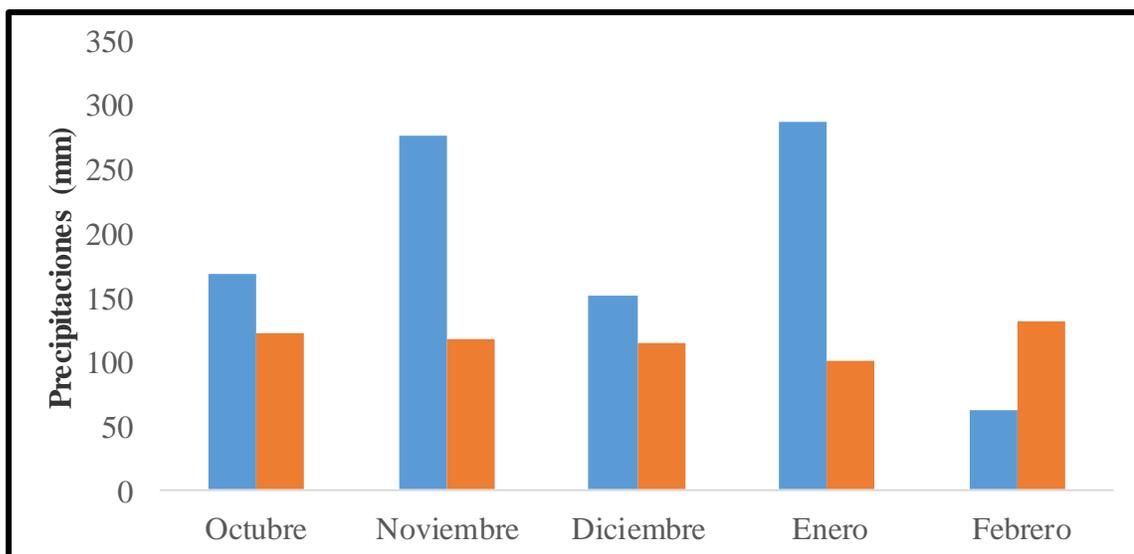
3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se analizaron los resultados con el software estadístico “Infostat” versión 2011. Se realizó análisis de la varianza, se hicieron pruebas de comparación múltiple (según Tukey al 5%) y regresión lineal entre rendimiento, NG y PMG.

3.6. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA EN EL PERÍODO DE CULTIVO

3.6.1. Precipitaciones

En la figura 1, se presentan las PP mensuales registradas en la estación meteorológica de la EEMAC para 2014-15 y los valores de PP medias para Paysandú, obtenidos en la serie histórica comprendida entre los años 1961 y 2009 (INUMET, 2014).



En las columnas naranja precipitaciones medias ocurridas en Paysandú para la serie histórica 1961 a 2009 y en columnas azules valores obtenidos en la estación meteorológica de la EEMAC, para el año 2014-15.

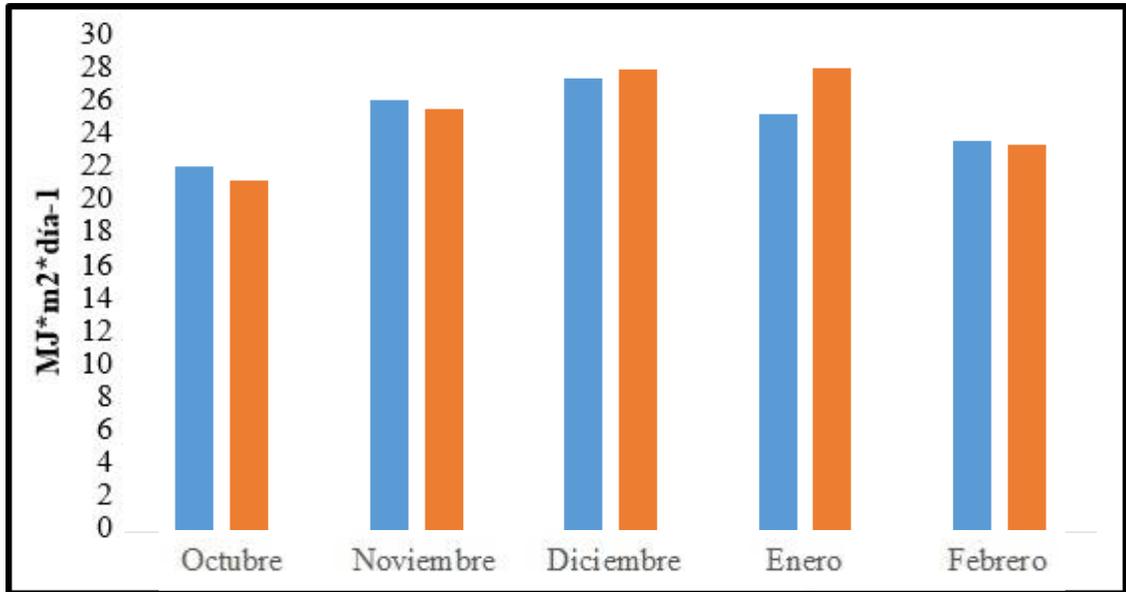
Figura No. 1. Precipitaciones promedio mensuales de la temporada 2014-15 y de la serie histórica 1961-2009.

Se aprecia que las PP de la primavera y verano 2014-15, exceptuando el mes de febrero, superaron las PP para los mismos meses de la serie histórica de años tomada como referencia. La mayor diferencia observada ocurrió en enero, mes en el que mayoritariamente el cultivo estuvo en el PC de determinación de rendimiento y las PP superaron a las de la serie histórica en casi tres veces su valor (288 vs. 100 mm). Por otro lado, en febrero las PP fueron cercanas al 50% del valor de la serie histórica mencionada.

Las PP acumuladas durante todo el período de cultivo fueron de 713 mm, de los cuales un 44% (316 mm) se concentraron desde el día 20 de diciembre al 20 de enero, coincidiendo con la etapa de máximos requerimientos hídricos.

3.6.2. Radiación solar incidente

En la figura 2, se presenta la información sobre radiación solar media diaria medida en MJ/m²/día para la serie histórica comprendida entre los años 2002-14, y los valores medios diarios de los meses en los que se desarrolló el cultivo.

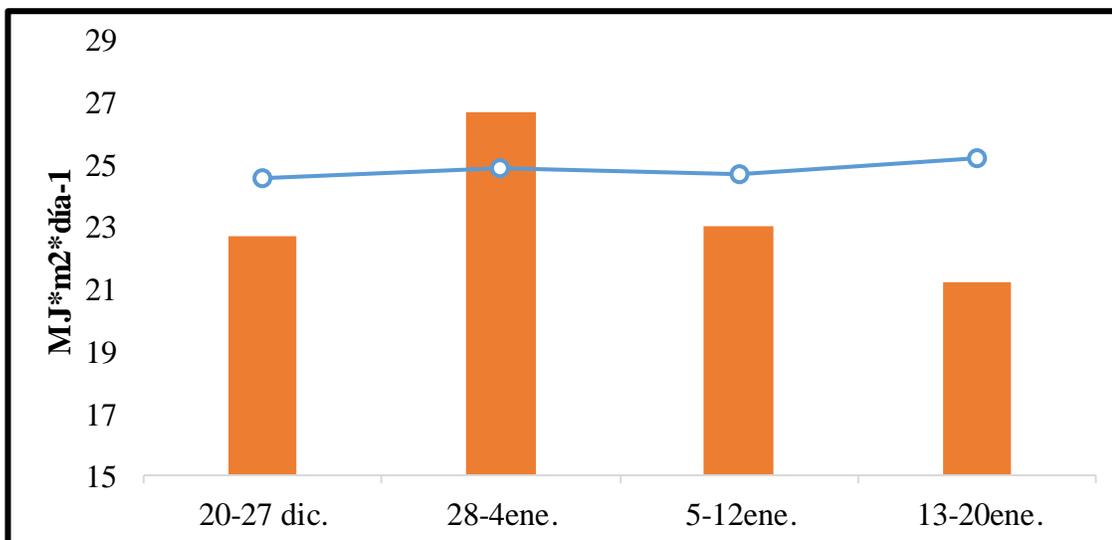


En columnas celestes temporada 2014-15 y en las columnas naranja, valores promedio de la serie histórica 2002-14.

Figura No. 2. Radiación solar (MJ/m²/día) de la temporada 2014-15 y de la serie histórica 2002-14.

Se observa que en los meses de diciembre y principalmente enero, la radiación solar incidente fue menor a la registrada en el promedio de la serie histórica 2002-14 para Paysandú. Esta información está relacionada con la mostrada en la figura 1, en la que se puede observar que para dichos meses en 2014-15, las PP fueron superiores a las ocurridas en promedio de la serie histórica, esto trajo como consecuencia un número mayor de días nublados, y por consiguiente menor radiación incidente.

El cultivo entre el 20 de diciembre y el 20 de enero aproximadamente se encontraba en su PC de determinación del rendimiento por tanto se puede inferir que la menor radiación recibida en dicha etapa pudo haber afectado negativamente el rendimiento potencial. Por lo tanto, para determinar la incidencia de dicho factor, se muestra en la figura 3, la radiación solar (MJ/m²/día) durante el PC, divididos en octavarios.



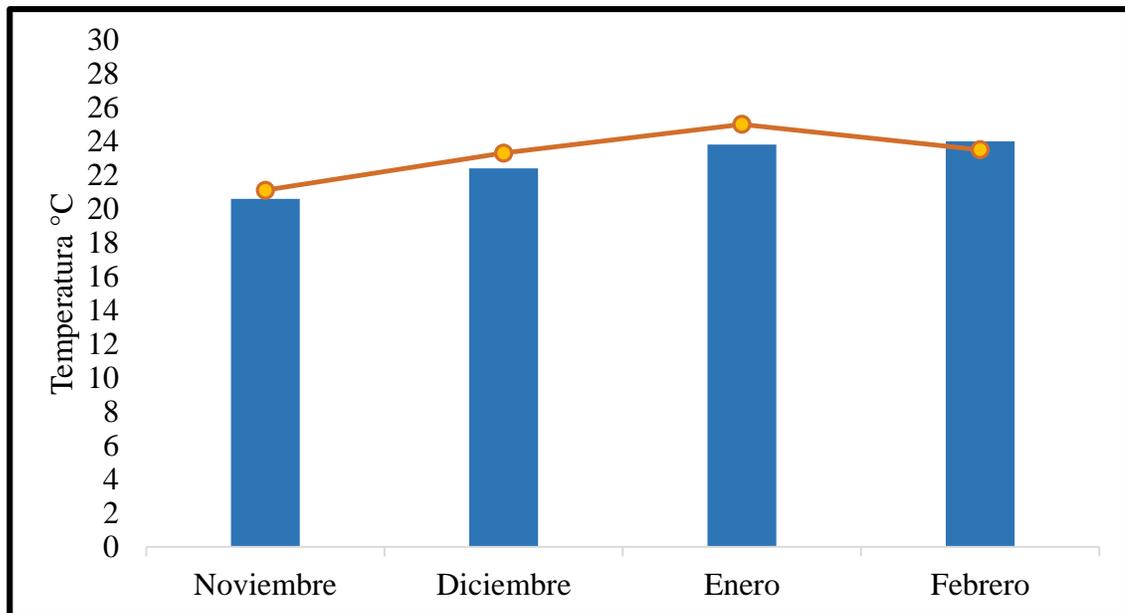
En columnas naranjas, temporada 2014-15 y en la línea azul la serie histórica 2002-2013, en Paysandú.

Figura No. 3. Radiación solar promedio diaria ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}$) en la EEMAC durante el transcurso del período crítico para la determinación de rendimiento en la temporada 2014-15 y en la serie histórica 2002-13.

Se puede observar que la radiación solar incidente recibida por el cultivo en dicho período estuvo por encima de la observada en la serie histórica, solamente en un 25% del mismo. A lo largo de todo el período experimental la radiación solar incidente total fue de $747 \text{ MJ}/\text{m}^2$, en contraste con los $795 \text{ MJ}/\text{m}^2$ de la serie histórica.

3.6.3. Temperatura

En la figura 4 se presentan los datos de temperatura media del año experimental 2014-15, junto con los datos de la serie histórica para la localidad de Paysandú desde 2002-14.



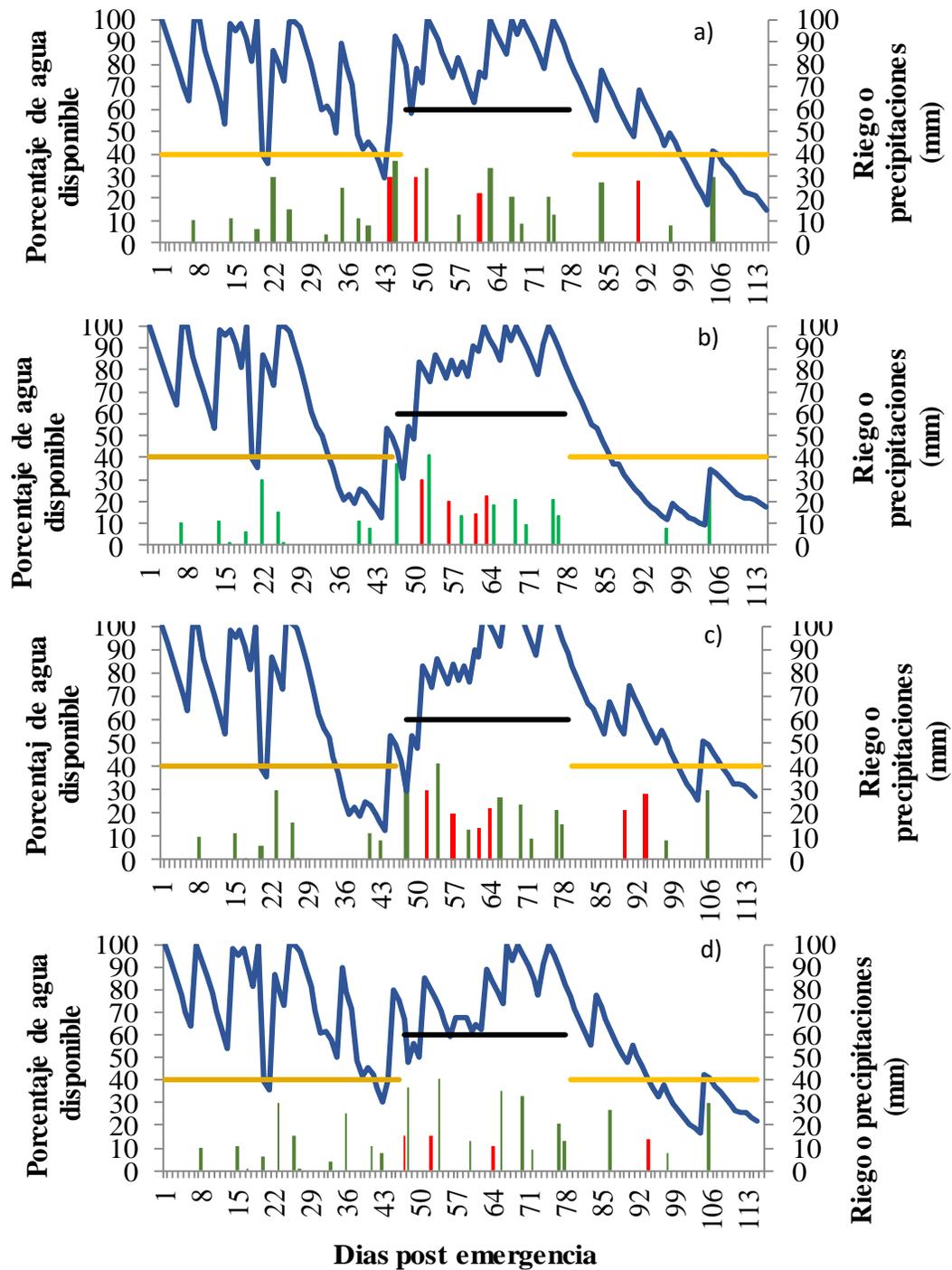
En columnas azules, temporada 2014-15 en la EEMAC y en línea naranja, serie histórica comprendida entre 2002-2014, en Paysandú.

Figura No. 4. Temperatura promedio mensual (°C) de la temporada 2014-15 y de la serie histórica 2002-14.

En la figura 4 se puede observar que las temperaturas durante el ciclo de crecimiento del cultivo estuvieron por debajo respecto a las obtenidas en la serie histórica durante los meses de noviembre, diciembre y enero, y algo superiores durante febrero, sin embargo, estas temperaturas no serían una limitante para el cumplimiento de las distintas etapas fenológicas del cultivo (Laffite, 2001).

3.6.4. Evolución del agua disponible en el suelo

En la figura 5 se muestra la evolución del contenido de AD en el suelo en porcentaje estimada mediante balance hídrico, a la profundidad radicular para los distintos tratamientos evaluados durante el ciclo del cultivo, junto a los umbrales de riego utilizados para cada etapa del cultivo, los riegos realizados y las precipitaciones.



La línea naranja indica el umbral de riego en etapas no críticas, la línea negra indica el umbral utilizado durante el PC y la línea azul indica el porcentaje de AD. Las columnas verdes indican las precipitaciones efectivas (mm), mientras que las columnas rojas, indican el riego efectivo (mm).

Figura No. 5. Evolución del porcentaje de AD para los tratamientos de BH a), BH en PC b), BH en PC+LL c) y RD d), respectivamente en orden descendente de la figura.

En el tratamiento de BH y de acuerdo al criterio definido de umbrales de AD, se pudo lograr casi totalmente el objetivo de mantener al cultivo en condiciones de confort hídrico. En la figura 5 a) se observa que existieron dos breves intervalos en que el AD presentó valores por debajo del 40%; los mismos ocurrieron en los días previos al comienzo del PC del cultivo y en el período comprendido entre los 100 y 105 días post emergencia (Dpe) cuando el cultivo se encontraba en la última etapa del ciclo (R5-R6).

En la figura 5 b) se observa la evolución del AD en el tratamiento de BH en PC y se constató un período previo al PC, comprendido entre los días 33 y 43 postemergencia, en el que el AD evolucionó por debajo del umbral de 40%, llegando a valores cercanos a 20 %. Este déficit hídrico logró revertirse posteriormente al comienzo del PC, por medio de PP y riego suplementario, logrando superar el umbral propuesto de 60 % durante la mayor parte de dicha etapa. Por otra parte, habiendo concluido el PC, el AD se mantuvo por debajo del 40% durante un período comprendido entre los 83 Dpe hasta el final del ciclo del cultivo, alcanzando valores cercanos al 20 % o incluso por debajo.

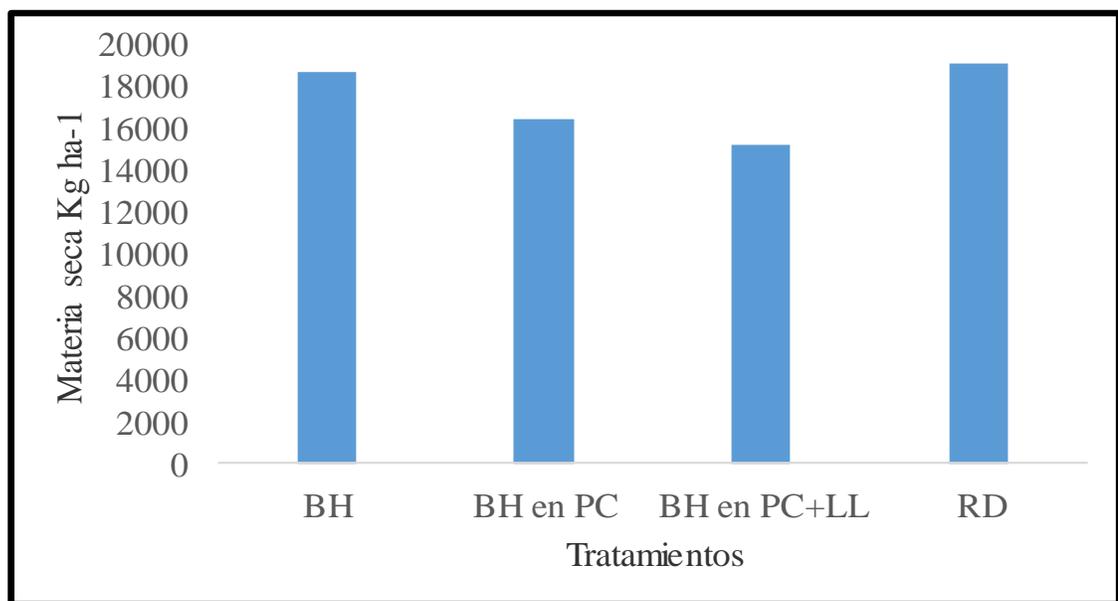
En el BH en PC+LL la evolución del AD es muy similar a lo observado en BH en PC para la etapa vegetativa, evolucionando por debajo del umbral designado durante un período de cerca de 10 días, previo al comienzo del PC. En el PC el cultivo se mantuvo durante toda la etapa en situación de confort hídrico, es decir con contenidos de AD superiores a 60 %. En la etapa de llenado de granos se logró mantener el AD por encima del 40%, excepto a un breve período que estuvo por debajo entre los 99 y 105 Dpe.

En la figura 5 d) se observa que la evolución del AD para el RD muestra valores menores comparados con el tratamiento de BH, sin embargo, evolucionó de forma similar al mismo. En la etapa de llenado de granos el AD se encuentra por debajo del umbral asignado, durante un período de 8 días aproximadamente.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. MATERIA SECA TOTAL

La figura 6 muestra la MS total medida al final del ciclo del cultivo para cada tratamiento evaluado.



BH: bienestar hídrico en todo el ciclo, BH en PC: bienestar hídrico en período crítico, BH en PC+LL: bienestar hídrico en período crítico y llenado de granos, RD: riego deficitario al 50 % de bienestar hídrico.

Figura No. 6. Materia seca (kg.ha⁻¹) obtenida para los tratamientos evaluados.

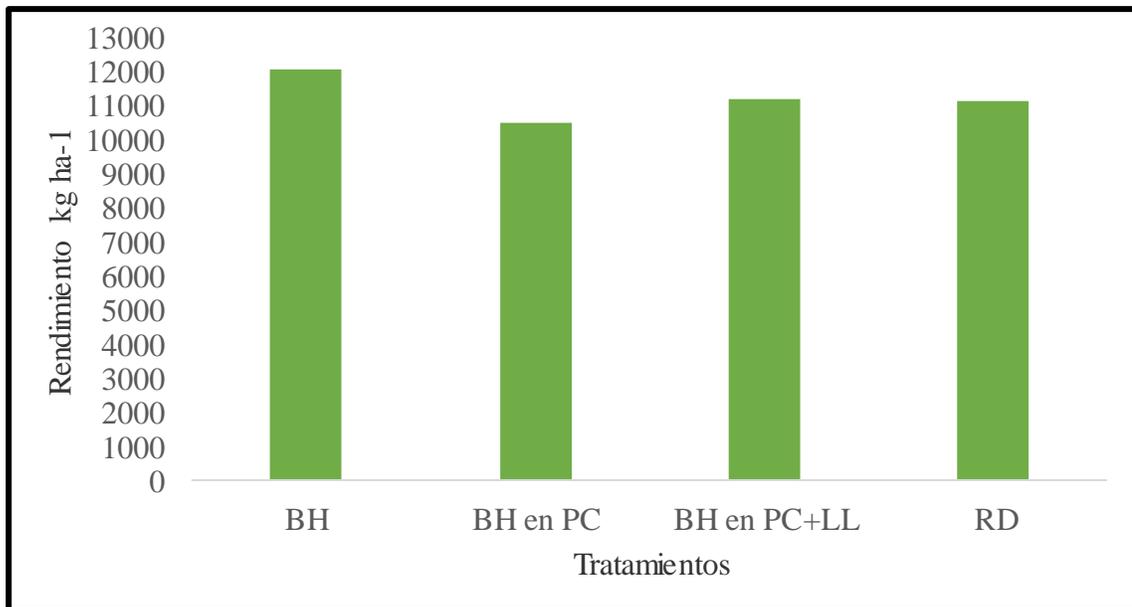
Los valores de MS encontrados son sensiblemente menores a los mencionados por Giménez (2012a) en experimentos similares en la misma localidad. Por su parte, Della Maggiora et al. (2000a) señalan una producción de MS total de 26,5 t ha⁻¹, para ensayos realizados en Balcarce, en tratamientos sin deficiencias hídricas. Si bien la acumulación de MS es función de la disponibilidad de agua que presente el cultivo para transpirar, ésta también depende de la eficiencia con que la planta logra aprovechar dicho recurso, conjuntamente con otros factores no menos importantes como son la radiación solar y la temperatura (Andrade et al., 1996). Por lo tanto, se puede plantear la hipótesis de que la menor acumulación de MS cuantificada en el presente experimento se debió a las inferiores condiciones de radiación solar y temperaturas que ocurrieron en

la mayor parte del PC. De hecho, los valores medios de radiación solar incidente fueron entre 2 y 3 MJ/día/m² inferiores a los mencionados por Carter y Petrella (2013), Callero (2014) para la misma localidad. A través de una prueba de comparación de medias múltiple ($P < 0.05$) se concluyó que no existieron diferencias significativas en la producción de MS total entre tratamientos, al igual que lo anteriormente citado por Giménez (2012a), Callero (2014). Sin embargo, Giménez (2012a) reporta un valor aproximado a 24000 kg ha⁻¹ de MS. En el presente ensayo la máxima producción de MS fue de 19167 kg ha⁻¹. Si bien para los tratamientos de BH en PC, y BH en PC+LL el AD estuvo por debajo de un 40% durante un breve período en la etapa vegetativa, previo al PC, esto no resultó en diferencias significativas con respecto al BH, lo cual difiere de lo mencionado en la bibliografía.

Los resultados obtenidos aseveran lo mencionado por Sinclair y Muchow (1999), que ante la ausencia de estrés biótico y abiótico, la acumulación de MS depende de la cantidad de radiación solar absorbida por el canopeo. Por consiguiente, con la previa aclaración de que los valores de IAF del cultivo a lo largo del ciclo no fueron cuantificados, se puede plantear la hipótesis de que las condiciones desfavorables en cuanto a radiación solar y temperatura del presente año, pudieron impedir que el cultivo lograra tempranamente altos valores de cobertura que permitieran interceptar rápidamente la máxima proporción de radiación solar incidente, afectando consecuentemente la acumulación de biomasa total y rendimiento en grano.

4.2. RENDIMIENTO EN GRANO

En la figura 7 se observa el rendimiento en grano obtenido en los distintos tratamientos evaluados.



BH: bienestar hídrico en todo el ciclo, BH en PC: bienestar hídrico en período crítico, Bh en PC+LL: bienestar hídrico en período crítico y llenado de granos, RD: riego deficitario al 50 % de bienestar hídrico.

Figura No. 7. Rendimiento en grano de los tratamientos evaluados.

Las diferencias de rendimiento observadas no fueron significativas, esto se explica por las PP abundantes registradas durante el PC, así como también al riego suplementario, lo que incidió en que no hubiera deficiencias hídricas de magnitud para causar diferencias entre los tratamientos evaluados. Aún así, hay diferencias numéricas o tendencias que se intentarán explicar por las deficiencias hídricas experimentadas en las diferentes etapas del cultivo y el agua efectiva que recibió cada tratamiento.

El mayor rendimiento fue logrado en el BH, el cual se ubicó cercano a las 12 t ha⁻¹, valor que se encuentra por debajo del obtenido en condiciones similares realizados anteriormente por distintos autores. Carter y Petrella (2013) mencionan un rendimiento cercano a las 13 t ha⁻¹ para un tratamiento en condiciones de confort hídrico durante todo el ciclo, en un ensayo realizado en Paysandú en 2013. Por su parte, Giménez et al. (2014) encontraron rendimientos que variaron entre 13 y 15 t ha⁻¹, para situaciones de confort hídrico de crecimiento del cultivo, así como la biomasa acumulada están positivamente asociadas con la radiación interceptada por el cultivo (Fisher y Palmer,

citados por Martínez, 2015). Así mismo, una menor temperatura podría afectar también la tasa de crecimiento del cultivo, actuando sobre la tasa fotosíntesis y modificando la duración de las distintas etapas ontogénicas. Las temperaturas subóptimas incrementan el tiempo entre los estadios vegetativos y el número total de hojas formadas, retrasando el desarrollo de la planta y reduciendo la disponibilidad de nutrientes (Fassio et al., 1998).

Al comparar los rendimientos obtenidos en el BH y el BH en PC, se observa una reducción en valores numéricos, de aproximadamente un 13%. Este valor es similar al reportado por Rivetti (2007), quien determina reducciones de alrededor de un 15%. Esto a su vez, se encuentra estrechamente relacionado con lo expuesto en la figura 6, observándose una diferencia en la acumulación de MS total de aproximadamente un 12 % en detrimento del BH en PC, según Hsiao y Bradford (1983), Sinclair et al. (1984), las deficiencias hídricas provocan una menor disponibilidad de agua para transpirar, y por consiguiente impedirían capitalizar en producción de biomasa las condiciones de radiación solar favorables. En este sentido, en la figura 5 se muestra la evolución del AD para ambos tratamientos y se puede ver que el BH en PC experimentó deficiencias hídricas durante una serie de días al comienzo del PC y durante gran parte de la etapa de llenado de granos.

Por otra parte, cuando se comparó el rendimiento del tratamiento de BH en PC+LL de granos con el de BH, se observó una reducción de rendimiento de un 7 %, es decir, una reducción menor que en el caso anterior. Esto concuerda con lo mencionado por Giménez et al. (2014), que señalan mermas de rendimiento de alrededor de un 6 % con deficiencias hídricas que ocurren solamente en la etapa vegetativa. El mayor rendimiento logrado por el BH en PC+LL con respecto al BH en PC se explica por el confort hídrico durante la etapa de llenado de granos, que condujo a un mejor PMG.

El RD tuvo un rendimiento un 8% inferior al obtenido en el BH, valor que se encuentra por debajo del citado por Steele et al. (1994), quienes mencionan mermas de rendimiento de aproximadamente 13 %. En este sentido, se puede inferir una vez mas acerca de la relación positiva existente entre la producción de MS total y el rendimiento, ya que como queda explícito en la figura 6, ambos tratamientos fueron los que mostraron una mayor producción de MS. Sin embargo, el menor rendimiento obtenido en el RD, podría explicarse por las deficiencias hídricas ocurridas en parte de la etapa de llenado de granos (ver figura 5), lo que incidió directamente en la deposición de materia seca y consiguiente rendimiento.

En el cuadro 2 se presentan el agua efectiva por etapas y tratamiento; se considera el agua efectiva como la suma de las PP efectivas y el riego efectivo.

Cuadro No. 2. Agua efectiva total estimada por etapas y tratamiento (mm).

ETAPAS	BH	BH en PC	BH en PC+LL	RD
Vegetativa	152	93	94	137
Período crítico	234	259	268	228
Llen. de grano	93	38	87	79
Total	479	390	449	444

BH: bienestar hídrico en todo el ciclo, BH en PC: bienestar hídrico en período crítico, BH en PC+LL: bienestar hídrico en período crítico y llenado de granos, 50% de RD: riego deficitario al 50 % de bienestar hídrico.

Las diferencias numéricas encontradas en cuanto a rendimiento entre tratamientos podrían explicarse por la diferencia de agua efectiva recibida y la distribución de las mismas dentro del ciclo del cultivo. Al analizar el cuadro 2, se aprecia que la cantidad de agua efectiva recibida por el tratamiento de BH en el PC fue de 89 mm menos durante todo el ciclo, en comparación a BH. Estas diferencias se ubicaron principalmente en la etapa vegetativa y comienzos del PC (39 % menos) y en la etapa de llenado de granos (60% menos). Esto explica una diferencia cercana a 1500 kg ha⁻¹ de rendimiento entre ambos tratamientos en detrimento del BH en el PC. Esta diferencia observada pone en manifiesto los efectos negativos sobre el rendimiento y sus componentes, causados por las deficiencias hídricas ocurridas en la etapa de llenado de granos y al comienzo del PC.

Por otra parte, comparando el consumo de agua en la situación de BH en relación al consumo en el BH en PC+LL, se observan menores diferencias a las anteriormente citadas, siendo éstas de 30 mm, ubicados en la etapa vegetativa y llenado de granos, 39% y 7% menores, respectivamente. Si bien la disminución en el agua recibida por el cultivo en la etapa vegetativa no difiere de la observada en BH durante PC, la menor deficiencia ocurrida en la etapa de llenado de granos, condujo a una menor merma en el rendimiento comparado al BH (800 kg ha⁻¹). Esto concuerda claramente con lo mencionado por diversos autores (Farré 1998, Riveti 2007, Farré y Faci 2009) sobre la importancia que tiene la magnitud y la distribución en el tiempo de las deficiencias de agua en el ciclo del cultivo, siendo de menor significancia sobre el rendimiento, las deficiencias ocurridas en la etapa vegetativa.

El RD presentó un consumo menor con respecto al BH de 35 mm que posteriormente significaron una pérdida de rendimiento de 900 kg ha⁻¹, es decir una reducción similar a la del tratamiento de BH en PC+LL. Sin embargo, en el tratamiento de RD las deficiencias se distribuyeron de forma diferente, siendo un 10 % en la etapa vegetativa y 15 % durante la etapa de llenado de granos. Estos resultados evidencian la

mayor importancia de las deficiencias localizadas en la etapa de llenado de granos, en comparación a la etapa vegetativa, visto que, como es ampliamente citado en la bibliografía (Grant et al. 1989, Rhoads y Bennett 1990), las deficiencias hídricas en dicha etapa pueden acelerar la senescencia, además de provocar un acortamiento del período de llenado, incidiendo negativamente en el PMG.

A través de estos resultados, se concluye que mantener el cultivo en BH durante el PC es de vital importancia para obtener rendimientos altos, como ha sido reportado por diversos autores (Maturano 2002, Rivetti 2007, Giménez et al. 2014); pero también importa mantener al cultivo en BH durante la etapa de llenado de granos. Esto queda puesto en manifiesto al observar los resultados, ya que aun teniendo presente que no se detectaron diferencias significativas, si analizamos los valores numéricos, el tratamiento de BH fue el que obtuvo mayor rendimiento.

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

En el cuadro 3 se muestran los resultados obtenidos en los principales componentes numéricos del rendimiento, es decir el NG por metro cuadrado y el PMG en los distintos tratamientos evaluados.

Cuadro No. 3. Número de granos por metro cuadrado (NG/m²) y peso de mil granos (PMG) para los distintos tratamientos evaluados.

Tratamientos	NG/m ²	PMG (gramos) (*)
BH	3985	303 AB
BH en PC	3940	266 B
BH en PC+LL	3770	298 AB
RD	3624	307 A

(*) Valores con letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p > 0,05$).

BH: bienestar hídrico en todo el ciclo, BH en PC: bienestar hídrico en período crítico, BH en PC+LL: bienestar hídrico en período crítico y llenado de granos, RD: riego deficitario al 50 % de bienestar hídrico.

En el cuadro 3 se observa que el valor numérico mayor del NG fue obtenido por el BH, no obstante cabe destacar que no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos. En la figura 5, se observa que los tratamientos evaluados no presentaron deficiencias hídricas durante el PC. Por ese motivo interpretamos que no se detectaron diferencias en el NG ya que es en el PC que se determina dicho componente del rendimiento. Los valores de NG obtenidos en el

presente ensayo son sensiblemente menores a los reportados por Carter y Petrella (2013), Giménez et al. (2014), de 4558 y 4500-6000 granos/m² respectivamente. Las condiciones hídricas no fueron una limitante, interpretamos que la radiación solar incidente menor recibida por el cultivo durante el PC afectó negativamente la fijación de granos. En este sentido, Brach y Gallard (2014) coinciden en que los niveles de radiación solar incidente elevados permiten una fijación de granos mayor y que la radiación interceptada durante todo el ciclo del cultivo y el NG se relacionan positivamente, incluso demostrando que durante el PC el NG se incrementa linealmente hasta que la radiación interceptada acumulada llega al umbral.

Con respecto al PMG se aprecia en el cuadro 3 que los tratamientos de RD y BH en PC difieren estadísticamente, siendo el primero el que obtuvo un mayor PMG. Este resultado además, reafirma la relación positiva existente entre la acumulación de MS total y el rendimiento final, ya que estos tratamientos fueron los que mostraron el mayor y el menor valor numérico de MS total respectivamente (figura 6). Los demás tratamientos, el de BH y el de BH en PC+LL, no difieren estadísticamente entre sí, y respecto a los demás, obteniendo un PMG del entorno a 300 gramos.

Las diferencias encontradas entre el tratamiento de BH en PC y RD, se deben principalmente a que el primero recibió 41 mm menos de agua efectiva durante la etapa de llenado de granos, comparado a RD (cuadro 2). Este comportamiento interpretamos que pudo haber causado un acortamiento de la etapa de llenado de granos (no medido), ya que de acuerdo a las determinaciones de NeSmith y Ritchie (1992), si la deficiencia hídrica ocurre durante la etapa de llenado de granos, la velocidad y la duración de la etapa decrecen a causa de una reducción en la fotosíntesis y a una aceleración de la senescencia foliar; consecuentemente el crecimiento del cultivo es menor y con ello el componente que se fija en esa etapa es menor.

El mayor PMG fue obtenido por el tratamiento de RD (cuadro 3), sin embargo cabe destacar que dicho tratamiento fue el que obtuvo un menor NG, por lo tanto este aumento en el PMG pudo haber actuado como una forma de compensación de la merma en el NG. Así mismo, dicha compensación en PMG no fue suficiente como para igualar los rendimientos observados en el BH, ya que como bien mencionan distintos autores (Andrade et al. 1996, Sadras et al. 2000), en maíz la compensación del bajo NG por un aumento en el PMG no permite obtener los rendimientos potenciales.

Los PMG encontrados, en el presente ensayo, son mayores a los encontrados por Giménez et al. (2014) en experimentos similares, quienes citan valores de PMG entre 250 y 280 gramos. Sin embargo, para realizar estas comparaciones cabe aclarar que el híbrido utilizado en el presente ensayo fue diferente al utilizado por dichos autores, por lo tanto, si bien hay similitud en el ambiente, las características genéticas del material utilizado podrían jugar un rol distintivo.

4.2.2. Efecto de las deficiencias hídricas sobre los subcomponentes del rendimiento

4.2.2.1. Espigas por planta y número de granos por espiga

En el cuadro 4 se presentan el número de espigas por metro cuadrado (NE m⁻²), el número de espigas por planta (NEP) y el NG por espiga (NG/espiga), para los distintos tratamientos del presente ensayo.

Cuadro No. 4. Número de espigas por metro cuadrado, número de espigas por planta y número de granos por espiga para cada tratamiento evaluado.

Tratamiento	NE m ⁻²	NG/espiga	NEP(*)
BH	10	389	1,01 A
BH en PC+LL	10	377	0,99 A
BH en PC	10	398	0,98 AB
RD	10	390	0,95 B

(*) Valores con letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p > 0,05$).

En base a la información presentada en el cuadro 4, y considerando la información mostrada en la figura 5 se puede concluir acerca del efecto causado por las deficiencias hídricas en los subcomponentes del rendimiento del maíz. Si bien en referencia al NG/espiga no se observan diferencias significativas entre tratamientos, cuando se analiza el NEP se observa que sí existen diferencias; siendo el tratamiento de BH distinto al de RD, mostrando una diferencia de 0,06 espigas por planta a favor del BH, lo que (tomando en cuenta una población lograda de 100000 pl ha⁻¹) significaría una diferencia de 6000 epigas ha⁻¹ o lo que es igual a aproximadamente 700 kg de grano ha⁻¹. Se debe destacar también la ocurrencia de esterilidad de plantas en algunos tratamientos, lo que se evidencia a través de un NEP menor a 1. Sin embargo, el tratamiento de BH también presentó un NEP mayor a 1, también se observaron algunos casos de plantas estériles, pero esto fue compensado con plantas de espigas dobles.

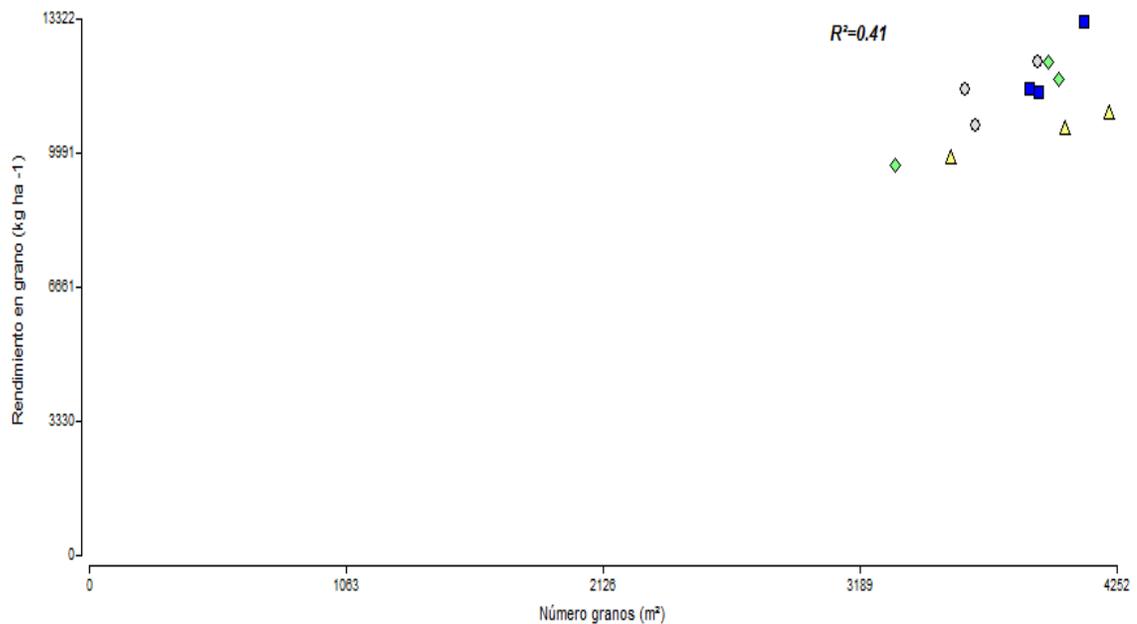
En cuanto a NG/espiga, si bien estadísticamente todos los tratamientos resultaron iguales, al observar más detalladamente los valores se aprecia que el tratamiento de BH en PC+LL fue el que presentó un menor valor. Esto está asociado a

las deficiencias hídricas experimentadas por el mismo durante una serie de días al comienzo del PC, lo que según diversos autores (Grant et al. 1989, Edmeades et al. 1993, Boyer y Westgate 2004) puede afectar negativamente dicho componente del rendimiento. Por consiguiente, el menor valor logrado en esta variable, al igual que el menor valor de espigas/planta, respecto a BH, puede estar explicando en parte las diferencias observadas en el NG m⁻² (cuadro 3) y rendimiento (800 kg ha⁻¹) observadas entre ambos tratamientos.

Asimismo, a diferencia de lo visto para NEP, los valores de NG/espiga encontrados, son similares a los reportados por Carter y Petrella (2013), quienes mencionan un valor de 386 granos/espiga para la situación de confort hídrico.

4.2.3. Relación entre rendimiento y componentes del rendimiento

En las figuras 8 y 9 se muestran las relaciones entre el rendimiento y el NG m⁻² y el PMG respectivamente según cada tratamiento.

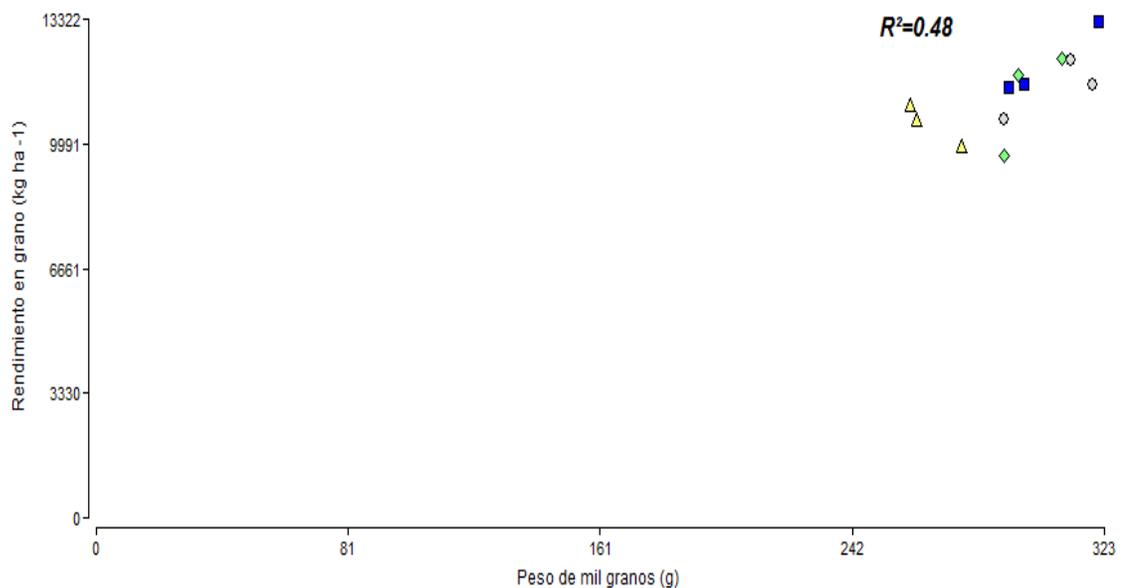


BH: bienestar hídrico en todo el ciclo (■), BH en PC: bienestar hídrico en período crítico (▲), BH en PC+LL: bienestar hídrico en período crítico y llenado de granos (◆) y RD: riego deficitario al 50 % de bienestar hídrico (○).

Figura No. 8. Relación entre el rendimiento en grano (kg ha⁻¹) y el número de granos m² según cada tratamiento evaluado.

En maíz el rendimiento está más asociado al NG logrados, que al peso de los mismos (Sadras et al. 2000, Cárcova et al. 2003, Giménez 2012a), como lo demuestran los altos coeficientes de determinación encontrados por distintos autores entre el NG y el rendimiento, $R^2=0,78$ (Suarez et al., 2005), $R^2=0,76$ (Cárcova et al., 2003), $R^2=0,95$ (Ceriani e Inella, 2012). Sin embargo, en el presente ensayo la relación encontrada para dichas variables es sensiblemente inferior ($R^2=0,41$), no observándose una diferencia clara entre los distintos tratamientos; aun así, el tratamiento sin deficiencias hídricas en todo el ciclo presenta los datos más agrupados en comparación a los demás, con rendimientos que se encuentran por encima de los 12000 kg ha⁻¹.

Los rendimientos evaluados en los distintos tratamientos no expresan diferencias significativas y esto determina que la relación entre los componentes del rendimiento y el rendimiento sea baja y no se ajuste, explicando así el bajo R^2 en este caso.



BH: bienestar hídrico en todo el ciclo (■), BH en PC: bienestar hídrico en período crítico (▲), BH en PC+LL bienestar hídrico en período crítico y llenado de granos (◆), RD: riego deficitario al 50 % de bienestar hídrico (●).

Figura No. 9. Relación entre el rendimiento en grano (kg ha⁻¹) y el peso de 1000 granos (g) según cada tratamiento evaluado.

Según Andrade et al. (1996), Giménez (2014), el PMG es un componente residual del rendimiento. Así mismo, si bien es conocido que ante una situación de bajo NG, la compensación por aumento del PMG no sería suficiente para lograr rendimientos potenciales (Andrade et al., 1996), no obstante explica una parte importante del rendimiento.

Si bien este componente ajusta en mayor medida que la relación observada entre NG y rendimiento ($R^2=0,41$), no sería correcto afirmar que el rendimiento se explica por el PMG, ya que un R^2 de 0,48 denota también una relación débil entre ambas variables.

4.3.EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO Y EFICIENCIA DE USO DEL AGUA

En el cuadro 5 se exponen detalladamente la ETc total y la EUA junto con el rendimiento logrado, con la intención de mostrar la influencia de estos factores.

Cuadro No. 5. Evapotranspiración del cultivo (mm) total estimada, rendimiento (kg/ha^{-1}) y eficiencia de uso del agua (kg mm^{-1}) para los distintos tratamientos evaluados.

Tratamiento	Evapotranspiración de cultivo (mm)	Rendimiento (kg ha^{-1})	Eficiencia de uso del agua (kg mm^{-1})
BH	488	12083	24,6
BH en PC	395	10508	26,2
BH en PC+LL	449	11244	25,4
RD	444	11134	24,9

En el cuadro 5, se observa que el tratamiento de BH fue el que presentó una mayor evapotranspiración de cultivo durante todo el ciclo con 488 mm y un promedio diario de 4,2 mm. Sin embargo, este valor está por debajo de los mencionados por Giménez et al. (2014), Callero (2014), quienes encontraron valores en torno a los 600 y 542 mm, respectivamente, de agua consumida durante todo el ciclo de cultivo, para la misma localidad. Del total evapotranspirado aproximadamente el 36% se produjo durante los 31 días que comprendió el PC. La mayor cantidad de agua evapotranspirada por el cultivo en situación de BH, resultó en una mayor producción de MS total,

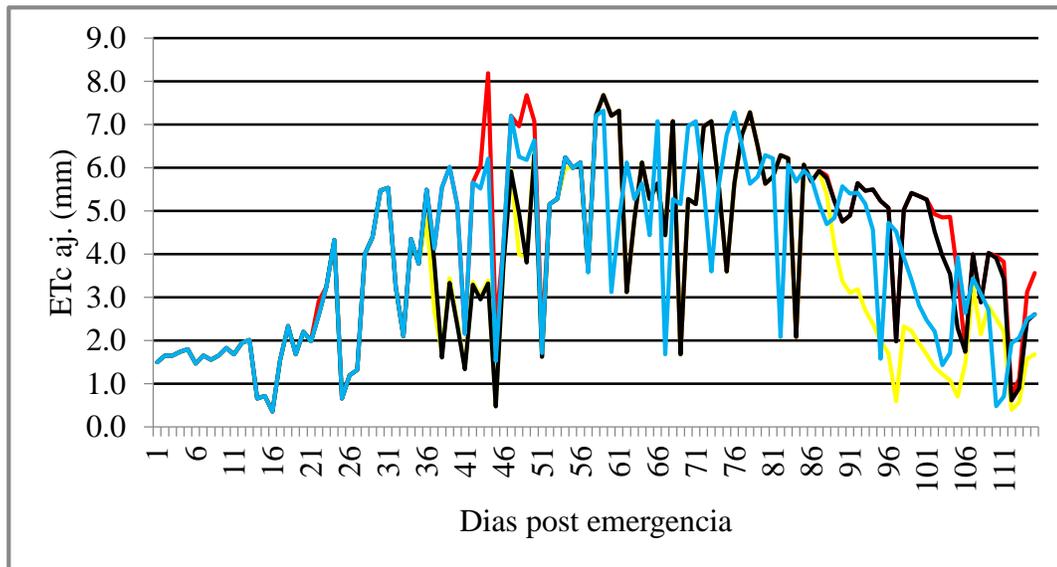
comparada a los demás tratamientos que sufrieron deficiencias en alguna parte de su ciclo.

Mientras tanto el menor valor de ETc observado en el presente ensayo lo mostró el tratamiento de BH en PC, con un total de 395 mm y un promedio diario de 3,4 mm. En la totalidad de su ciclo, el mismo evapotranspiró aproximadamente un 20% menos que BH. Las deficiencias hídricas ocurridas en este tratamiento durante el llenado de grano, que quedan explícitas cuando se observa la evolución de AD en la figura 5, determinaron una reducción del 32% de la evapotranspiración en dicha etapa. Se puede inferir que la menor ETc observada durante esta etapa en particular tuvo como consecuencia que este tratamiento mostrara la menor acumulación de MS total y el menor PMG encontrado en este ensayo.

La menor ETc observada en el ensayo, en comparación a lo reportado por Giménez et al. (2014), Callero (2014) es determinada por una menor radiación solar incidente, resultante de la mayor nubosidad constatada en este año clasificado como “Niño”. En este sentido, Giménez (2011) menciona que la ETc en los cultivos de verano es menor en años “Niño”, por presentar mayor nubosidad, debido a los excesos de PP que en los años “Niña” con PP escasas.

Por otro lado, si bien se comentó anteriormente que todos los tratamientos resultaron estadísticamente iguales en cuanto a rendimiento, los valores muestran la relación positiva existente entre la ETc y el rendimiento, tal como lo mencionan distintos autores (Andrade et al. 1996, Payero et al. 2008).

Con el propósito de observar cómo fue la evolución de la ETc durante todo el ciclo en los distintos tratamientos, en la figura 10 se presentan los valores diarios obtenidos en cada uno de ellos durante los 115 días de duración del ciclo.



La línea roja: BH; línea amarilla: BH en PC; línea negra: BH en PC+LL; línea celeste: RD.

Figura No. 10. Evolución de la ETc diaria para los distintos tratamientos evaluados.

En la figura 10, se puede apreciar, en concordancia a lo mencionado por Della Maggiora et al. (2000b), que en general todos los tratamientos presentan bajas tasas iniciales de ETc a causa de ser un cultivo erectófilo, aumentando progresivamente hasta llegar a sus valores máximos cercano al estado VT. Los mayores valores de ETc se observan entre los 30 y los 85 Dpe, coincidiendo con los meses de diciembre y enero con mayor demanda evaporativa y el máximo desarrollo vegetativo del cultivo. La alta variación observada se debe a la preponderancia de días nublados o con PP, los cuales explican las abruptas caídas de un día a otro.

Para este experimento el valor máximo de ETc diaria alcanzado fue encontrado en el BH, siendo este de $8,2 \text{ mm día}^{-1}$, valor superior a los reportados por Della Maggiora et al. (2000a), quienes estimaron una tasa máxima del orden de los $7,6 \text{ mm día}^{-1}$. Sin embargo, este dato es relativo al año y localidad, dependiendo el mismo de la radiación solar, nubosidad, temperaturas, etc.

En la figura 10, se observa que los tratamientos de BH en PC y BH en PC+LL experimentan un descenso en la ETc entre los 36 y los 48 Dpe, incluso llegando a valores muy bajos, lo que consecuentemente afectó los resultados obtenidos en cuanto a rendimiento, NG y PMG, como fue comentado anteriormente.

Por otro lado, también queda explícito en la figura 10 la progresiva disminución de la ETc en el tratamiento de BH en PC, comparado a los demás tratamientos, a partir

de los 87 Dpe hasta casi el final de su ciclo. Esto claramente causó también un efecto negativo en los resultados obtenidos por el mismo, sobre todo en el PMG, contribuyendo a un menor rendimiento.

4.3.1. Eficiencia en el uso del agua

En referencia a la EUA en los distintos tratamientos, como queda explícito en el cuadro 6, el valor encontrado para BH fue de $24,6 \text{ kg mm}^{-1}$ de agua evapotranspirada, no observándose diferencias significativas con los demás tratamientos. Este valor se encuentra por encima de lo reportado por Ceriani e Inella (2012), quienes mencionan 18 kg mm^{-1} evapotranspirado, sin embargo cabe aclarar que dichos autores no utilizan ETc act. Por otro lado, en la bibliografía se reportan valores en torno a $25 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ (Steele et al., 1994) o valores que varían entre los 26 y 29 kg mm^{-1} en Argentina con niveles productivos comprendidos entre 10900 y 16000 kg.ha^{-1} de grano (Vallone et al., 2003).

El BH en PC fue el tratamiento que presentó mayor valor numérico, siendo $26,2 \text{ kg mm}^{-1}$ de agua evapotranspirada; valor que se asemeja al reportado por Rivetti (2007) de $27 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ en ensayos similares realizados en Argentina. Sin embargo, estos valores únicamente sirven como punto de referencia, ya que según mencionan Della Maggiora et al. (2000a), 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. Por esta razón, se pueden explicar las diferencias entre los valores reportados por los distintos autores.

5. CONCLUSIONES

En el ensayo no se detectaron diferencias significativas en el rendimiento entre las estrategias de manejo del agua estudiadas. Sin embargo, mantener el maíz en condiciones de bienestar hídrico durante las diferentes etapas del ciclo del cultivo fue la alternativa que logró mejor rendimiento en términos numéricos en relación a las demás estrategias de manejo de agua evaluadas.

Por otra parte, mantener el cultivo con bienestar hídrico solamente en el período crítico no resultó en una alternativa viable para lograr rendimientos potenciales, como consecuencia de los efectos negativos observados en el número y peso de granos, causados por los déficit hídricos ocasionados al comienzo de dicha etapa y en la etapa de llenado de granos respectivamente. Este comportamiento productivo parece estar relacionado con un menor número de espigas por planta, un menor número de granos por espiga y un menor peso de granos.

En la estrategia de mantener el cultivo con bienestar hídrico en el período crítico y en la etapa de llenado de granos se observó un rendimiento que se encuentra solamente por debajo del bienestar hídrico durante todo el ciclo. La causa del mejor comportamiento productivo frente al bienestar hídrico sólo en el período crítico fue el mejor peso de granos.

El riego deficitario al 50% de bienestar hídrico durante todo el ciclo en el año de evaluación mostró buen desempeño durante la etapa vegetativa y la etapa de llenado de granos, pero demostró ser insuficiente para cubrir las necesidades hídricas durante el comienzo del período crítico, afectando negativamente el número de espigas por planta y consecuentemente el número de granos final. Por lo tanto, producto de los resultados obtenidos, esta estrategia de riego demostró ser una alternativa promisoriosa para continuar siendo investigada, ya que además de comportarse con buen rendimiento, permitiría bajar los costos de riego a la mitad en comparación al bienestar hídrico durante todo el ciclo. No obstante, habría que evaluarlo en diferentes condiciones de precipitaciones, ya que si bien con su aplicación se logra disminuir los costos del riego, en años con deficiencias hídricas principalmente en el período crítico pueden variar los rendimientos de este ensayo.

6. RESUMEN

Durante el verano 2014-2015, se desarrolló en la Estación Experimental “Dr. M. A. Cassinoni” situada de Paysandú, Uruguay, un experimento en el cual se evaluó el efecto de mantener un cultivo de maíz sin deficiencias hídricas durante todo el ciclo y en las distintas etapas del mismo, además de evaluar también el efecto del riego deficitario (RD). Para inducir las deficiencias hídricas se utilizaron simuladores de sequía móviles en diferentes etapas del ciclo de cultivo y el riego suplementario fué aplicado por goteo. En el ensayo se determinó rendimiento, componentes de rendimiento y materia seca (MS) a final de ciclo, de cuatro tratamientos. El tratamiento testigo corresponde a bienestar hídrico durante todo el ciclo (BH), un segundo tratamiento de BH solamente en período crítico (PC), el siguiente se basó en BH durante el PC y la etapa de llenado de granos (BH en PC+LL) y el cuarto tratamiento a RD al 50% del riego aplicado al BH durante todo el ciclo (RD). El diseño experimental utilizado fue un diseño en bloques completamente al azar (DBCA), con tres repeticiones y cuatro tratamientos. Los análisis de varianza y regresiones lineales fueron realizados mediante el programa estadístico INFOSTAT 2011. No se observaron diferencias significativas en cuanto a la deposición de MS a fin de ciclo, sin embargo el tratamiento de RD fue el que registró el máximo valor numérico, entorno a 19200 kg ha^{-1} . De igual forma, en cuanto a rendimiento tampoco se encontraron diferencias significativas entre tratamientos. El máximo valor fue registrado por el tratamiento de BH, con aproximadamente 12000 kg ha^{-1} . Sin embargo al contrastar este tratamiento con el BH en PC, se observa una disminución de rendimiento de aproximadamente un 13%, quedando explícito el efecto negativo de una menor cantidad de agua efectiva recibida tanto en la etapa vegetativa como en llenado de granos. Por otra parte, cuando se compara el BH en PC+LL contra BH, las diferencias disminuyen, siendo solamente un 7%, a causa de una mayor cantidad de agua efectiva recibida en la etapa de llenado de granos, evitando que el PMG sea mayormente afectado. Por otro lado también se analizaron las variables NG y PMG. No se encontraron diferencias significativas en cuanto a NG, siendo el tratamiento de BH el que arrojó un valor máximo de 3985 granos/m^2 ; sin embargo para PMG si se observaron diferencias significativas entre tratamientos, siendo el BH en PC el que presenta un menor valor, en consecuencia principalmente de haber recibido una cantidad menor de agua efectiva en la etapa de llenado de granos, aproximadamente un 66% que la recibida por BH. La relación entre el rendimiento y sus componentes, tanto NG como PMG no se ajustaron en el presente experimento.

Palabras clave: Maíz; Deficiencia hídrica; Agua; Riego.

7. SUMMARY

It was developed during the summer 2014-2015, an experiment at the Experimental Station “Dr M. A. Cassioni” located in Paysandú, Uruguay in which the effect of maintaining a maize crop without water deficiencies during the whole cycle and in the different stages of the cycle was evaluated, as well as to evaluate the effect of deficit irrigation (DI). To induce water deficiencies, mobile drought simulators were used at different stages of the crop cycle and supplemental irrigation was applied by drip irrigation. The job consisted in quantifying yield, performance components and dry matter (DM) at the end of the cycle for four treatments. The control treatment corresponds to a crop without water deficiencies in the whole cycle (WW), a second treatment well watered only in critical period (WW in CP), the following was well watered during the CP and grain filling stage (WW in CP+GF) and the fourth was DI in the whole cycle which corresponds to 50% of well watered crop (DI). The experimental design used was a completely randomized block design, with three replications and four treatments. The analysis of variance and linear regression were performed using the statistical program INFOSTAT 2011. No statistical differences were observed in the DM deposition at the end of the cycle; while the treatment of DI recorded the maximum value around 19200 kg ha⁻¹. There were no significant differences in performance either, the WW registered the maximum value of 12000 kg ha⁻¹. However, when this treatment is compared with WW in CP, a decrease in yield of approximately 13% is observed, with the negative effect of a smaller amount of effective water received both in the vegetative stage and in grain filling. On the other hand, when WW in CP+GF is compared against WW, the differences decrease, being only 7%, because of a greater amount of effective water received in the grain filling stage, avoiding the thousand kernel weight being most affected. After that, kernel number and thousand kernel weight were also analyzed. There were no significant differences in kernel number, being WW which recorded the maximum value of 3985 grains / m²; however for thousand kernel weight, significant differences were observed, with WW in CP recording the lowest value, mainly due to the fact of having received a smaller amount of effective water in the grain filling stage, about 66% than the amount received by WW. The relationship between yield and its components such as kernel number and weight did not adjust in this experiment.

Key words: Maize; Water deficit; Water; Irrigation.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Aldrich, A. D.; Leng, E. R. 1974. Producción moderna del maíz. Buenos Aires, Hemisferio Sur. 307 p.
2. Ali, M. H. 2010. Crop water requirement and irrigation scheduling. In: Ali, H. ed. Fundamentals of irrigation and on-farm water management. New York, USA, Springer. v.1, pp. 399-452.
3. Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration; guidelines for computing crop water requirements. Roma, FAO. 300 p.
4. Amer, K. H. 2010. Corn crop response under managing different irrigation and salinity levels. *Agricultural Water Management*. 97 (10):1553-1563.
5. Andrade, F. H. 1992. Radiación y temperatura determinan los rendimientos máximos de maíz. Buenos Aires, INTA. 16 p. (Boletín Técnico no. 106).
6. _____; Gardiol, J. 1994. Sequía y producción de los cultivos de maíz, girasol y soja. Buenos Aires, INTA. 23 p. (Boletín Técnico no. 13).
7. _____; Cirilo, A; Uhart, S.; Otegui, M. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. Balcarce, Buenos Aires, La Barrosa. pp. 82-239.
8. _____; Vega, C.; Uhart, S.; Cirilo, A.; Cantarero, M.; Valentinuz, O. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Science*. 39: 453-459.
9. _____; Aguirrezabal, L.; Rizzalli, R. 2000a. Crecimiento y rendimiento comparado. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, INTA Balcarce/UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 61-96.
10. _____; 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, INTA Balcarce/UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 173-206.
11. _____. 2000c. Producción potencial y demanda futura de alimentos agrícolas. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y

la soja. Buenos Aires, Argentina, INTA Balcarce/Facultad de Ciencias Agrarias UNMP. pp. 9-28.

12. Aslam, M.; Zamir, M.; Afzal, I.; Yaseen, M.; Mubeen, M.; Shoaib, A. 2013. Drought stress, its effect on maize production and development of drought tolerance through potassium application. (en línea). *Cercetări Agronomice în Moldova*. 46(2): 99-114. Consultado 29 ago. 2015. Disponible en http://www.univagro-iasi.ro/CERCET_AGROMOLD/CA2-13-09.pdf
13. Ausín, I.; Alonso-Blanco, C.; Martínez-Zapater, J. M. 2005. Environmental regulation of flowering. (en línea). *The International Journal of Developmental Biology*. 49: 689-705. Consultado 10 jun. 2015. Disponible en http://www.researchgate.net/profile/Israel_Ausin/publication/7663458_Environmental_regulation_of_flowering/links/0fcfd506af4db84047000000.pdf
14. Avedaño, A. C. H.; Molina, J. D.; Trejo, L. C.; López, C. C.; Cadena, I. J. 2008. Respuesta a altos niveles de estrés hídrico en maíz. Alajuela, Costa Rica, *Agronomía Mesoamericana*. 19 (1): 27-37.
15. 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. (en línea). *Agricultural Water Management*. 128: 65-71. Consultado 12 set. 2015. Disponible en [http://www.researchgate.net/profile/Ruhi_Bastug/publication/257941271_The_influence_of_regular_deficit_irrigation_applications_on_water_use_yield_and_quality_components_of_two_corn_\(Zea_mays_L.\)_genotypes/links/00b4952665752d2f58000000.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Ruhi_Bastug/publication/257941271_The_influence_of_regular_deficit_irrigation_applications_on_water_use_yield_and_quality_components_of_two_corn_(Zea_mays_L.)_genotypes/links/00b4952665752d2f58000000.pdf)
16. Baethgen, W. E. 1999. Aplicaciones de pronósticos climáticos en el sector agropecuario. *Revista CREA*. no. 204: 22-24.
17. _____; Giménez, A. E. 2002. Aplicación de pronósticos climáticos estacionales e información satelital para mejorar la toma de decisiones en el sector agropecuario; ejemplos de la sequía 1999-2000 en Uruguay y otros. (en línea). Montevideo, INIA. 14 p. (Documentos online no. 26). Consultado 11 jun. 2015. Disponible en http://inia.inia.org.uy/disciplinas/agroclima/publicaciones/sistemas/uso_informacion_satelital.pdf

18. _____.; Terra, R. 2010. El riego en un clima cambiante. *In*: Seminario Internacional Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Boscana. pp. 7 - 18.
19. Baker, D. N.; Musgrave, R. B. 1964. Photosynthesis under field conditions; further plant chamber studies of the effect of light on corn (*Zea mays* L.). *Crop Science*. 4(2): 127-131.
20. Benjamin, J. G.; Nielsen, D. C.; Vigil, M. F.; Mikha, M. M.; Calderon, F. 2015. Cumulative deficit irrigation effects on corn biomass and grain yield under two tillage systems. *Agricultural Water Management*. 159:107-114.
21. Bidegain, M.; Caferra, M. 1999. Tendencias climáticas para enero, febrero y marzo del año 2000. (en línea). Montevideo, UdelaR. Facultad de Ciencias. 3 p. Consultado 07 jul. 2015. Disponible en http://www.inia.org.uy/disciplinas/agroclima/fpta_pron_clim/foros/ciencias_99_12.htm
22. Birch, C. J.; Robertson, M. J.; Humphreys, E.; Hutchins, N. 2003. Agronomy of maize in Australia in review and prospect. (en línea). *In*: Versatile Maize – Golden Opportunities; Australian Maize Conference (5th., 2003, Toowoomba, Australia). Proceedings. Toowoomba, s.e. pp. 45-54. Consultado 04 set. 2015. Disponible en http://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:9698/Agronomy_of_Maiz.pdf
23. Blair, E. 1979. Riego por goteo. *In*: Seminario Latinoamericano de Riego por Goteo (3º., 1979, Sao Pablo, Brasil). Trabajos presentados. San José, Costa Rica, IICA. pp. 1-16.
24. Blasina y Asociados. 2013. El oro maya reluce en Uruguay: año récord para el maíz. *El Observador*, Montevideo, UY, may. 2: 7.
25. Boerger, A. 1928. Observaciones sobre agricultura; quince años de trabajos fitotécnicos en el Uruguay. Montevideo, Imprenta Nacional. s.p.
26. Bonhomme, R. 2000. Beware of comparing RUE values calculated from PAR vs. solar radiation or absorbed vs. intercepted radiation. *Field Crops Research*. 68: 247-252.

27. Boyer, J. S. 1982. Plant productivity and environment. (en línea). Science. 218: 443-448. Consultado 26 ago. 2015. Disponible en <http://www.sciencemag.org/content/218/4571/443.full.pdf>
28. _____; Westgate, M. E. 2004. Grain yields with limited water. (en línea). Journal of Experimental Botany. 55 (407):2386-2392. Consultado 17 ago. 2015. Disponible en <http://jxb.oxfordjournals.org/content/55/407/2385.full>
29. Brach, A. M.; Gallard, A. 2014. Efecto de la densidad de siembra en el rendimiento de maíz bajo riego. Voces y Ecos. 32:16-19.
30. Çakir, R. 2004. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of maize. Field Crops Research. 89: 1–16.
31. Cantarero, M. G.; Cirilo, A. G.; Andrade, F. H. 1999. Night temperature at silking affects kernel set in maize. Crop Science. 39: 703–710.
32. Carámbula, M.; Terra, J. 2000. Las sequías: antes, durante y después. Montevideo, INIA. 134 p. (Boletín de Divulgación no. 74).
33. Cárcova, J.; Abeledo, L. G.; López Pereira, M. 2003. Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes. 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, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 73-98.
34. Cardellino, G.; García, F. 1995. Manejo de suelos y agua en el cultivo de maíz. In: Puignau, J. P. ed. Maíz; sistema de producción. Montevideo, Uruguay, IICA. pp. 167-176.
35. _____; Baethgen, W. 2000. Análisis de la viabilidad de sistemas de riego para maíz; estudio de casos y evaluación de estrategias (en línea). Montevideo, INIA. 9 p. (Documentos online no. 08). Consultado 7 jul. 2015. Disponible en <http://www.inia.uy/Publicaciones/Paginas/publicacion-658.aspx>
36. Carlesso, R. 2010. Manejo del riego y asesoramiento al regante; riego suplementario y siembra directa. In: Seminario internacional Potencial del Riego Extensivo

en Cultivos y Pasturas (1°. , 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Boscana. pp. 103-114.

37. 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).
38. Caviglia, O. P.; Sadras, V. 2001. Effect of nitrogen supply on crop conductance, water and radiation use efficiency of wheat. *Field Crops Research*. 69(3): 259-266.
39. _____.; Melchiori, R. J. M.; Kemerer, A.; Van Opstal, N. V.; Gregorutti, V. C. 2007. Relaciones entre las eficiencias en el uso del nitrógeno y de la radiación en maíz. (en línea). Paraná, Argentina, INTA. pp. 7-12 (Serie de Extensión no. 44). Consultado 28 set. 2015. Disponible en http://www.agropanorama.com/news/001_enero2008/02_07a11/inta_parana_radiacionmaiz_serie_ext_44_01.pdf
40. Commuri, P. D.; Jones, R. J. 2001. High temperatures during endosperm cell division in maize; a genotypic comparison in vitro and field conditions. *Crop Science*. 41:1122–1130.
41. Corsi, W. C. 1982. Regionalización agroclimática de Uruguay para cultivos. *Miscelánea CIAAB*. no. 40. 28 p.
42. Cruz, G.; Baethgen, W.; Picasso, V.; Terra, R. 2014. Análisis de sequías agronómicas en dos regiones ganaderas de Uruguay. *Agrociencia* (Montevideo). 18 (1): 92-102.
43. 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, 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, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 373-440.
44. Debórtoli, G. D.; Marozzi, D. G.; Méndez, M.; Currie, H. 2005. Evaluación de los sistemas de riego por manto y platabanda en el cultivo de maíz (*Zea mays*, L.). Corrientes, Argentina, Universidad Nacional del Noreste. 4 p.

45. Della Maggiora, A. I.; Gardiol, J. M.; Irigoyen, A. I.; Suero, E. E.; Serio, L. 2000a. Efecto de la disponibilidad de agua del suelo sobre la transpiración, eficiencia de transpiración y rendimiento de un cultivo de maíz (*Zea mays*). In: Congreso Brasileño de Meteorología (11°. 2000, Rio de Janeiro, Brasil). Trabajos presentados. Rio de Janeiro, Brasil, s.e. pp. 293-301.
46. _____.; _____.; _____. 2000b. Requerimientos hídricos. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, girasol y la soja. Buenos Aires, Editorial Médica Panamericana. pp. 155-171.
47. Di Paolo, E.; Rinaldi, M. 2007. Yield response of corn to irrigation and nitrogen fertilization in a Mediterranean environment. (en línea). Field Crops Research. 105(3): 202-210. Consultado 28 set. 2015. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429007002006>
48. Doorenbos, J.; Pruitt, W. O. 1977. Las necesidades de agua de los cultivos. Roma, FAO. 194 p. (Serie Riego y Drenaje Drenaje no. 24).
49. _____.; Kassam, A. H. 1979. Yield response to water. Roma, FAO. pp. 101-104 (Irrigation and Drainage no. 33).
50. Dornelas, L. P.; Aquino, L. A.; Marques, P.; Nunes, P.; Oliveira Xavier, F. 2013. Doses de nitrogênio na cultura do milho para altas produtividades de grãos. (en línea). Revista Brasileira de Milho e Sorgo. 12 (3): 270-279. Consultado 28 set. 2015. Disponible en http://rbms.cnpms.embrapa.br/index.php/ojs/article/view/449/pdf_62
51. Downey, L. A. 1971. Effect of gypsum and drought stress on maize; consumptive use of water. Agronomy Journal. 63:597-600.
52. Durán, A. 1986. Los suelos del Uruguay. Montevideo, Hemisferio Sur. 398 p.
53. _____.; García Préchac, F. 2007. Suelos del Uruguay; origen, clasificación, manejo y conservación. Montevideo, Hemisferio Sur. 334 p.

54. Eck, H. V. 1986. Effects of water deficit on yield, yield components, and water use efficiency of irrigated corn. (en línea). *Agronomy Journal*. 78:1035-1040. Consultado 18 ago. 2015. Disponible en <http://www.cprl.ars.usda.gov/wmru/pdfs/1986.%20Eck,%20H.V.%20Effects%20of%20Water%20Deficits%20on%20Yield,%20Yield%20Co.pdf>
55. Edmeades, G. O.; Bolanos, J.; Hernandez, M.; Bello, S. 1993. Causes for silk delay in a lowland tropical maize population. *Crop Science*. 33:1029- 1035.
56. El-Hendawy, S. E.; El-Lattief, E. A. A.; Ahmed, M. S.; Schmidhalter, U. 2008. Irrigation rate and plant density effects on yield and water use efficiency of drip-irrigated corn. *Agricultural Water Management*. 95 (7):836-844.
57. 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.
58. Elverdín, J.; Córdova, D. 1993. Sequía; colapso de la empresa agropecuaria. *Visión Rural*. 5: 9-11.
59. Espósito, G.; Balboa, G.; Cerliani, C.; Balboa, R. 2015. Rendimiento potencial de maíz. *In: Garay, J. A.; Colazo, J. C. eds. El cultivo de maíz en San Luis*. San Luis, Argentina, INTA. pp. 32-50.
60. Evans, L.; Fischer, R. 1999. Yield potential; its definition, measurement and significance. (en línea). *Crop Science*. 39: 1544-1551. Consultado 26 ago. 2015. Disponible en <http://libcatalog.cimmyt.org/download/reprints/98699.pdf>
61. FAO (Food and Agriculture Organization, IT). 2014. Base de datos estadísticos. (en línea). Roma. s.p. Consultado 10 jun. 2017. Disponible en <http://www.fao.org/faostat>
62. Farnham, D. E.; Benson, G. O.; Pearce, R. B. 2003. Corn perspective and culture. *In: White, P. J.; Johnson, L. A. eds. Corn; chemistry and technology*. St. Paul, Minnesota, American Association of Cereal Chemicals. pp. 1-33.
63. Farré, I. 1998. Respuesta del maíz al riego deficitario por inundación en distintas fases de su desarrollo. *In: Farré, I. ed. Respuesta del maíz (Zea mays L.) y sorgo (Sorghum bicolor L. Moench) al riego deficitario; agronomía y modelización*. Lérida, España, Universidad de Lérida. pp. 67-114.

64. _____.; Faci, J. M. 2009. Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a mediterranean environment. *Agricultural Water Management*. 96 (3):383-394.
65. Fassio, A.; Carriquiry, A. I.; Tojo, C.; Romero, R. 1998. Maíz; aspectos sobre fenología. Montevideo, INIA. 44 p. (Serie Técnica no. 101).
66. Fereres, E.; Soriano, M. A. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. (en línea). *Journal of Experimental Botany*. 58(2):147-159. Consultado 10 set. 2015. Disponible en <http://jxb.oxfordjournals.org/content/58/2/147.full.pdf+html>
67. Fischbach, P. E.; Somerhalder, E. R. 1974. Irrigation design requirement for corn. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 17 (1):162-171.
68. Gardner, F. P.; Pearce, R. B.; Mitchell, R. L. 1985. *Physiology of crop plants*. Iowa, University Press. pp. 187-209.
69. Giménez, L.; Mosco, M. 1996. Riego en maíz; una alternativa a evaluar. *Cangüé*. no. 8: s.p.
70. _____. 2000. Efecto del riego sobre el rendimiento y calidad de algodón y maíz. In: Seminario Investigación Aplicada (1º., 2000, Las Brujas, Canelones). Trabajos presentados. Montevideo, PRENADER. s.p
71. _____. 2010. Efectos de la disponibilidad hídrica en diferentes etapas de desarrollo de maíz y soja. In: Seminario Internacional Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Boscana. pp. 29-37.
72. _____.; García Petillo, M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia* (Montevideo). 15 (2): 100-108.
73. _____. 2012a. ¿Cuánto estamos perdiendo por no regar en Uruguay? In: Seminario Internacional Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (2º., 2012, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Boscana. pp. 35-41.

74. _____. 2012b. Producción de maíz con estrés hídrico provocado en diferentes etapas de desarrollo. *Agrociencia* (Montevideo). 16 (2): 92-102.
75. _____.; Canosa, G.; Prieto, C.; Grasso, J. P.; Montero, A.; Rameau, M.; Rosa, A.; Arévalo, R. 2014. Respuesta al riego suplementario en cultivos de verano y evaluación de pérdidas de rendimiento por deficiencias hídricas. In: Giménez, L. ed. *Riego suplementario en cultivos y pasturas*. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 9-28 (FPTA no. 55).
76. Girona, J.; Bonastre, N.; Marsal, J. 2014. Estrategias de gestión de riego eficiente y sostenible; riego deficitario controlado o una oportunidad inteligente en el uso de recursos naturales. In: *Seminario Internacional Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (3º, 2014, Paysandú, Uruguay)*. Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Zonalibro. pp. 79-94.
77. Gómez, P. A. 1991. Disponibilidad hídrica y fecha de siembra como factores determinantes del rendimiento en maíz. Tesis Ing. Agr. Mar del Plata, Argentina. UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. 39 p.
78. Grant, R. F.; Jackson, B. S.; Kiniry, J. R.; Arkin, G. F. 1989. Water deficit timing on yield components in maize. *Agronomy Journal*. 81:61-65.
79. Hagman, R. H. 1986. Nitrate metabolism in roots and leaves. In: Shannon, J. C.; Knievel, D. P.; Boyer, C. D. eds. *Regulation of carbon and nitrogen reduction and utilization in maize*. s.l., American Society of Plant Physiologists. pp. 105-116.
80. Hall, A. J.; Lemcoff, J. H.; Trapani, N. 1981. Water stress before and during flowering in maize and its effects on yield, its components, and their determinants. *Maydica*. 26:19-38.
81. Hatlilgil, M. B.; Olson, R. A.; Compton, W. A. 1984. Yield, water use, and nutrient uptake of corn hybrids under varied irrigation and nitrogen regimes. *Fertilizer Research*. 5(3):321-333.
82. Hattendorf, M. J.; Redelfs, M. S.; Amos, B.; Stone, L. R.; Gwin, R. E. 1988. Comparative water use characteristics of six row crops. *Agronomy Journal*. 80 (1):80-85.

83. Heermann, D. F.; Martin, D. L.; Jackson, R. D.; Stegman, E. C. 1990. Irrigation scheduling controls and techniques. *In*: Stewart, B. A.; Nielsen, D. R. eds. Irrigation of agricultural crops. Madison, ASA. pp. 509-535.
84. Herrero, M. P.; Johnson, R. R. 1981. Drought stress and its effects on maize reproductive systems. *Crop Science*. 21(1): 105-110.
85. Hill, D.; Guron, Y. 1973. Relation between ET rate and maize yield. *Water Resource Research*. 9 (3):743-748.
86. Hoefl, R. G.; Nafziger, E. D.; Johnson, R. R.; Aldrich, S. R. 2000. Corn as a crop. *In*: Nafziger, E.D.; Johnson, R. R.; Aldrich, S. R.eds. Modern corn and soybean production. s.l., MSCP Publications. pp. 1-29.
87. Hsiao, T. C. 1973. Plant responses to water stress. *Annual Review of Plant Physiology*. 24 (1): 519-570.
88. _____; Bradford, K. J. 1983. Physiological consequences of cellular water deficits. *In*: Taylor, H. M.; Jordan, W. R.; Sinclair, T. R. eds. Limitations to efficient water use in crops production. Madison, Rop Science Society of América. pp. 227-265.
89. Huang, R.; Birch, C. J.; George, D. L. 2006. Water use efficiency in maize production-the challenge and improvement strategies. *In*: Maize Association of Australia Triennial Conference (6th., 2006, Griffith, New South Wales). Proceedings. Griffith, Australia, Maize Association of Australia. s.p.
90. Hunt, L. A.; Poorten, G. van der. 1985. Carbon dioxide exchange rates and leaf nitrogen contents during ageing of the flag and penultimate leaves of five spring wheat cultivars. *Canadian Journal of Botany*. 63: 1605 –1609.
91. INUMET (Instituto Uruguayo de Meteorología, UY). 2014. Aspectos generales del clima durante el verano en el Uruguay. (en línea). Montevideo. 5 p. Consultado 07 jul. 2015. Disponible en <http://www.meteorologia.com.uy/reportes/dcd/verano.pdf>
92. Jensen, M. E. 1973. Consumptive use of water and irrigation water requirements. New York, American Society of Civil Engineers. 215 p.
93. Jeong, S.; Clark, S. E. 2005. Photoperiod regulates flower meristem development in *Arabidopsis thaliana*. (en línea). *Genetics*. 169: 907-915. Consultado 10 jun.

2015. Disponible en
<http://www.genetics.org/content/169/2/907.full.pdf+html>

94. Karam, F.; Breidy, J.; Stephan, C.; Roupheal, J. 2003. Evapotranspiration, yield and water use efficiency of drip irrigated corn in the Bekaa Valley of Lebanon. (en línea). *Agricultural Water Management*. 63(2):125-137. Consultado 19 ago. 2015. Disponible en
http://www.researchgate.net/profile/Fadi_Karam/publication/4875211_Evapotranspiration_yield_and_water_use_efficiency_of_drip_irrigated_corn_in_the_Bekaa_Valley_of_Lebanon/links/02e7e527344b443900000000.pdf
95. Katerji, N.; Campi, P.; Mastrorilli, M. 2013. Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*. 130:14-26.
96. Kiniry, J. R.; Ritchie, J. T.; Musser, R. L. 1983a. Dynamic nature of the photoperiod response in maize. *Agronomy Journal*. 75(4): 700-703.
97. _____.; _____.; _____.; Flint, E. P.; Iwig, W. C. 1983b. The photoperiod sensitive interval in maize. *Agronomy Journal*. 75(4): 687-690.
98. Klocke, N.; Currie, R.; Kisekka, I.; Stone, L. 2015. Corn and Grain Sorghum Response to Limited Irrigation, Drought, and Hail. (en línea). *Applied Engineering in Agriculture*. 30 (6):915-924. Consultado 12 jul. 2015. Disponible en <http://www.researchgate.net/publication/271838064>
99. Kruk, B.; Satorre, E. H. 2003. Densidad y Arreglo Espacial del cultivo. *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, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 279-318.
100. Lafitte, H. R. 2000. Abiotic stresses affecting maize. *In*: Paliwal, R. L.; Granados, G.; Lafitte, H. R.; Violic, A. D. eds. *El maíz en los trópicos; mejoramiento y producción*. Roma, Italia, FAO. pp. 93-103 (*Producción y Protección Vegetal*. no. 28).
101. Lindquist, J. L.; Arkebauer, T. J.; Walters, D. T.; Cassman, K. G.; Dobermann, A. 2005. Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions. *Agronomy Journal*. 97:72-78.

102. López Fuster, P. 2000. Los regadíos de la mancha oriental; una quimera hecha realidad. Albacete, Instituto Técnico Agronómico Provincial. 133 p.
103. Lorens, G. F.; Bennett, J. M.; Loggale, L. B. 1987. Differences in drought resistance between two corn hybrids; water relations and root length density. *Agronomy Journal*. 79 (5): 802-807.
104. Lourente, E. R. P.; Ontocelli, R.; Souza, L. C. F.; Goncalves, M. C.; Marchetti, M. E.; Rodrigues, E. T. 2007. Culturas antecessoras, doses e fontes de nitrogênio nos componentes de produção do milho. (en línea). *Acta Scientiarum Agronomy*. 29(1):55-61. Consultado 28 set. 2015. Disponible en <http://eduem.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/66/29>
105. Luque, S. F.; Cirilo, A. G.; Otegui, M. E. 2006. Genetic gains in grain yield and related physiological attributes in Argentine maize hybrids. *Field Crops Research*. 95: 383-397.
106. Magalhaes, A.; Da Silva, W. J. 1987. Determinantes genético-fisiológicos da produtividade do milho; melhoramiento produção do milho. Sao Paulo, Fundacao Cargill. 425 p.
107. Martellotto, E.; Salas, P.; Lovera, E.; Salinas, A.; Manzini, P. 1999. Módulo de capacitación, experimentación y transferencia de tecnología en riego suplementario. Proyecto de intensificación de granos. Manfredi, Córdoba, INTA. pp. 4-13.
108. Martínez, D. 2015. Ecofisiología del cultivo de maíz. *In*: Garay, J. A.; Colazo, J. C. eds. El cultivo de maíz en San Luis. San Luis, Argentina, INTA. pp. 7-37.
109. Martínez, F.; Cordone, G. 2000. Avances en el manejo de azufre; novedades en respuesta y diagnóstico en trigo, soja y maíz. (en línea). *In*: Jornada de Actualización Técnica para Profesionales “Fertilidad 2000” (1º., 2000, Rosario, Argentina). Trabajos presentados. Rosario, Argentina, INPOFOS cono Sur. pp. 28-30. Consultado 28 set. 2015. Disponible en http://www.researchgate.net/publication/242212339_Avances_en_el_manejo_del_Azufre_Novedades_en_respuesta_y_diagnostico_en_trigo_soja_y_maz
110. Martínez, R.; Margiotta, F.; Reinoso, F.; Martínez, R. M. 2012. Buscando alcanzar altos rendimientos del maíz: experiencias en los valles . (en línea). *In*: Reunión Internacional de Riego (3º., 2012, Manfredi, Córdoba). Trabajos presentados. Manfredi, Córdoba, INTA. pp. 129-155. Consultado 29 ago.

2015. Disponible en http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_libro_3_reunin_internacional_de_riego_2012_maiz.pdf
111. Maturano, M. 2002. Estudio del uso del agua y del nitrógeno dentro del marco de una agricultura sostenible en las regiones maiceras Castellano-Manchega y Argentina. Tesis doctoral. Albacete, España. Universidad de Castilla-La Mancha. 194 p.
112. Mendoza, A. E. 2013. Riego por goteo. (en línea). La Libertad, El Salvador, CENTA. MAG. 90 p. Consultado 02 set. 2015. Disponible en <http://www.centa.gob.sv/docs/guias/riego/Riego%20por%20Goteo%202013.pdf>
113. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2003. Encuesta agrícola “primavera – verano 2011”. (en línea). Montevideo. 3 p. Consultado 09 jul. 2015. Disponible en <http://www2.mgap.gub.uy/portal/afiledownload.aspx?2,5,149,O,S,0,4398%3BS%3B1%3B36,>
114. _____. _____. 2013. Estadísticas agropecuarias; series históricas de datos. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 20 may. 2015. Disponible en [http://www.mgap.gub.uy/portal/hgxpp001.aspx?7,5,60,O,S,0,MNU;E;2;16;10;9;MNU;,"](http://www.mgap.gub.uy/portal/hgxpp001.aspx?7,5,60,O,S,0,MNU;E;2;16;10;9;MNU;,)
115. Molfino, J. H.; Califra, A. 2001. Agua disponible en las tierras del Uruguay; segunda aproximación. (en línea). Montevideo, MGAP. División Suelos y Aguas. Dirección de Recursos Naturales Renovables. 12 p. Consultado 7 jul. 2015. Disponible en http://www.cebra.com.uy/renare/wp-content/files_mf/1376398534Agua_disponible.pdf
116. Monteith, J. L.; Moss, C. J. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain and discussion. (en línea). Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. 281(980): 277-294. Consultado 25 may. 2015. Disponible en <http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/281/980/277>
117. Moser, S. B.; Feil, B.; Jampatong, S.; Stamp, P. 2005. Effects of pre-anthesis drought, nitrogen fertilizer rate, and variety on grain yield, yield components, and harvest index of tropical maize. Agricultural Water Management. 81: 41–58.

118. Moss, G. T.; Downey, L. A. 1971. Influence of drought stress on female gametophyte development in corn (*Zea mays* L.) and subsequent grain yield. *Crop Science*. 11:368-372.
119. Muchow, R. C. 1989. Comparative productivity of maize, sorghum and pearl millet in a semi-arid tropical environment; II. Effect of water deficits. *Field Crops Research*. 20: 207-219.
120. Musick, J. T.; Dusek, D. A. 1978. Irrigated corn yield response to water. (en línea). *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 23(1): 92-103. Consultado 25 set. 2015. Disponible en <http://eurekamag.com/pdf/000/000687356.pdf>
121. Namuco, O. S.; O'toole, J. C. 1986. Reproductive stage water stress and sterility. Effect of stress during meiosis. *Crop Science*. 26: 317-321.
122. NeSmith, D. S.; Ritchie, J. T. 1992. Maize response to a severe soil water deficit during grain filling. *Field Crops Research*. 29: 23-35.
123. Norman, J. M.; Arkebauer, T. J. 1991. Predicting canopy light-use efficiency from leaf characteristics. In: Boote, K. J.; Loomis, R. S. eds. *Modeling crop photosynthesis from biochemistry to canopy*. Madison, WI, Crop Science Society of América. pp. 75-94.
124. 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.
125. Ober, E. S.; Setter, T. L.; Madison, J. T.; Thompson, J. F.; Shapiro, P. S. 1991. Influence of water deficit on maize endosperm development. Enzyme activities and RNA transcripts of starch and zein synthesis, cell division, and abscisic acid. (en línea). *Plant Physiology*. 97: 154-164. Consultado 15 ago. 2015. Disponible en <http://www.plantphysiol.org/content/97/1/154.full.pdf>
126. Ojeda, B. W. O.; Ibarra, E. S.; Weiss, H. U. 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. (en línea). *Agrociencia*. 40 (1):13-25. Consultado 13 jul. 2015. Disponible en <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2006/ene-feb/art-2.pdf>
127. Olson, R. A.; Thompson, C. A.; Grabouski, P. H.; Stukenholtz, D. D.; Frank, K. D.; Dreier, A. F. 1964. Water requirement of grain crops as modified by fertilizer use. *Agronomy Journal*. 56(4): 427-432.

128. 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. Mar del Plata, Argentina. UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. 93 p.
129. _____.; Melón, S. 1997. Kernel set and flower synchrony within the ear of maize; sowing date effects. *Crop Science*. 37: 441-447.
130. Outtar, S. R.; Jones, J.; Crookston, R. K.; Kajeiou, M. 1987. Effect of drought on water relations of developing maize kernels. *Crop Science*. 27: 730-735.
131. 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 10 jun. 2017. Disponible en http://www.fao.org/docrep/003/x7650s/x7650s02.htm#P0_0
132. Pandey, R. K.; Maranville, J. W.; Chetima, M. M. 2000. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment; shoot growth, nitrogen uptake and water extraction. *Agricultural Water Management*. 46:15-27.
133. Payero, J. O.; Tarkalson, D. D.; Irmak, S.; Davison, 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*. 95 (8): 895-908.
134. Perdomo, C.; Hoffman, E. 2011. Manejo del nitrógeno en maíz: actualidad y perspectivas. *In*: Simposio Nacional de Agricultura (2º., 2011, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 61-75.
135. Pereira, L. S.; Alves, I. 2005. Crop water requirements. *In*: Hillel, D. ed. *Encyclopedia of soils in the environment*. Londres, Elsevier. v.1, pp. 322-334.
136. Pérez, F. V.; Peña, E. P. 2013. Necesidades hídricas de los granos. (en línea). Las Tunas, Cuba, Universidad de Las Tunas. Facultad de Ciencias Agrícolas. 62 p. Consultado 8 jul. 2015. Disponible en <http://www.eumed.net/libros-gratis/ciencia/2013/23/index.htm>
137. Phene, C. J.; Reginato, R. J.; Itier, B.; Tanner, B. R. 1990. Sensing irrigation needs. *In*: Hoffman, G. J.; Howell, T. A.; Solomon, K. H.; Joseph, S. eds.

Management of farm irrigation systems. Saint Joseph, American Society of Agricultural Engineers. pp. 429-443.

138. Piedrabuena, L. 2010. ¿Es viable el riego extensivo en Uruguay? In: Seminario Internacional Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Boscana. pp. 165–175.
139. Plénet, D. 1995. Fonctionnement des cultures de maïs sous contrainte azotée. Détermination et application d'un indice de nutrition. (en línea). Thèse de doctorat. Nancy, France. Université de Lorraine. 115 p. Consultado 14 set. 2015. Disponible en http://docnum.univ-lorraine.fr/public/INPL_T_1995_PLENET_D.pdf
140. Puiatti, J. M.; Crespi, R. J.; Rivetti, A. R.; Cantero, A.; Bonadeo, E. 1985. Respuesta al cultivo de maíz (*Zea mays* L.) al riego ya la fertilización en la zona de Río Cuarto. In: Congreso Nacional del Agua (12º., 1985, Mendoza, Argentina). Trabajos presentados. Mendoza, Argentina, INTA. pp. 15-32.
141. Radford, P. J. 1967. Growth analysis formulae; their use and abuse. *Crop Science*. 7: 171-175.
142. Rhoads, F. M.; Bennett, J. M. 1990. Corn. In: Stewart, B. A.; Nielsen, D. R. eds. *Irrigation of agricultural crops*. Madison, Wisconsin, ASA/CSSA/SSSA. pp. 569-596.
143. Ritchie, S. W.; Hanway, J. J.; Benson, G. O. 1986. How a corn plant develops. Ames, Iowa State University of Science and Technology. 21 p. (Special report no. 48).
144. Rivetti, A. R. 2004. Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto, Córdoba, Argentina. Tesis Magíster Scientiae. Mendoza, Argentina. Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Agrarias. 92 p.
145. _____. 2006. Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto, Córdoba, Argentina; rendimiento en grano de maíz y sus componentes. (en línea). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. 38:25-36. Consultado 13 jul. 2015. Disponible en http://t.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/1309/rivettiagrarias2-06.pdf

146. _____. 2007. Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto, Córdoba, Argentina; producción de materia seca. (en línea). Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. 38 (2):25-36. Consultado 13 jul. 2015. Disponible en http://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/1527/rivettiagrarias39-1.pdf
147. Romero, R. 2000. Necesidades de agua de riego en maíz. In: Jornada de Cultivos de Verano (2000, La Estanzuela, Colonia). Tecnología de producción de cultivos y pasturas. Montevideo, INIA. pp. 7-13 (Actividades de Difusión no. 227).
148. Roselli, S.; Texeira, J. 1998. Efecto del manejo del agua de riego sobre las características productivas de maíz para grano. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 85 p.
149. Rosenthal, W. D.; Kanemasu, E. T.; Raney, R. J.; Stone, L. R. 1977. Evaluation of an evapotranspiration model for corn. *Agronomy Journal*. 69(3):461-464.
150. Rosielle, A. A.; Frey, K. J. 1975. Estimates of section parameters associated with harvest index in oat lines derived from a bulk population. *Euphytica*. 24:121-131.
151. Saavedra, C.; Fagúndez, D. 2013. El censo general agropecuario 2011 y la nueva realidad agropecuaria. (en línea).Revista Plan Agropecuario. 145: 64-68. Consultado 20 may. 2015. Disponible en http://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R145/R_145_64.pdf
152. 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, Argentina, INTA Balcarce/UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 29-56.
153. Sáenz, R.; Echeverría, H.; Studdert, G. 2008. Diagnóstico de las necesidades de nitrógeno del cultivo de maíz mediante análisis de suelo en el sudeste bonaerense. *Visión Rural*. 5: 57-58.
154. Saini, H. S.; Westgate, M. E. 1999. Reproductive development in grain crops during drought. *Advances in Agronomy*. 68: 59-96.

155. Salvagiotti, F. 2009. Rendimientos potenciales en maíz; brechas de producción y prácticas de manejo para reducirlas. INTA. Para Mejorar la Producción. 41: 61-66.
156. _____. 2014. Bases para el manejo nutricional en maíz y soja de alto rendimiento. In: Seminario Internacional Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (3º., 2014, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Zonalibro. pp. 36-41.
157. Sangoi, L.; Schmitt, A.; Vieira, J.; Picoli, G. J.; Souza, C. A.; Trezzi, R.; Schenatto, D.; Giordani, W.; Boniatti, C. M.; Cardoso, G.; Horn, D. 2012. Variabilidade na distribuição espacial de plantas na linha e rendimento de grãos de milho. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*. 11 (3): 268-277.
158. Santos, M. M.; Galvão, J. C. C.; Silva, I. R.; Miranda, G. V.; Finger, F. L. 2010. Épocas de aplicação de nitrogênio em cobertura na cultura do milho em plantio direto, e alocação do nitrogênio (15N) na planta. (en línea). *Revista Brasileira de Ciências do Solo*. 34: 1185-1194. Consultado 28 set. 2015. Disponible en <http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v34n4/18.pdf>
159. Saseendran, S. A.; Ahuja, L. R.; Nielsen, D. C.; Trout, T. J.; Ma, L. 2008. Use of crop simulation models to evaluate limited irrigation management options for corn in a semi-arid environment. (en línea). *Water Resource Research*. 44 (7): s.p. Consultado 12 set. 2015. Disponible en <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007WR006181/full>
160. Satorre, E. H. 2002. Generación del rendimiento en el cultivo de maíz; efectos de la nutrición nitrogenada. In: Jornada de Actualización Técnica de Profesionales (3ª., 2002, Rosario, Argentina). Trabajos presentados. Rosario, Argentina, INPOFOS Cono Sur. pp. 19-23.
161. Sawchik, J.; Formoso, F. 2000. Inserción del riego en rotaciones de cultivos y pasturas. In: Jornada de Cultivos de Verano (2000, La Estanzuela, Colonia). Tecnología de producción de cultivos y pasturas. Montevideo, INIA. pp. 13-15 (Actividades de Difusión no. 227).
162. Schussler, J. R.; Westgate, M. E. 1991. Maize kernel set at low water potential. Sensitivity to reduced assimilates at pollination. *Crop Science*. 31:1196-1203.
163. Sharma, J. K.; Bhalla, S. K. 1990. Genetics of some drought tolerant traits in maize. *Crop Improvement*. 17(2): 144-149.

164. Shaw, R. H. 1974. A weighted moisture stress index for corn in Iowa. *Iowa State Journal of Research*. 49(2): 101-114.
165. _____.; Newman, J. E. 1987. Weather stress in the corn crop. *In*: Nielsen, R. ed. *National corn handbook*. West Lafayette, USA, Purdue University. pp. 65-71.
166. Shibles, R. M.; Weber, C. R. 1966. Interception of solar radiation and dry matter production by various soybean planting patterns. *Crop Science*. 6: 55-59.
167. Sinclair, T. R.; Tanner, C. B.; Bennett, J. M. 1984. Water-use efficiency in crop production. (en línea). *BioScience*. 34(1): 36 - 40. Consultado 14 ago. 2015. Disponible en <http://soilphysics.okstate.edu/teaching/soil-4683/references/sinclair%20et%20al%201984.pdf>
168. _____. 1993. Crop yield potential and fairy tales. *In*: Buxton, D. R.; Baezinger, P. S. eds. *International crop science I*. Madison, WI, Crop Science Society of America. pp. 707-711.
169. _____.; Muchow, R. C. 1999. Radiation use efficiency. *Advances in Agronomy*. 65: 215-265.
170. Somerhalder, B. R. 1962. Design criteria for irrigating corn. *Research in Agricultural Engineering*. 43:336-348.
171. Steele, D. D.; Stegman, E. C.; Gregor, B. L. 1994. Field comparison of irrigation scheduling methods for corn. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 37:1197-1203.
172. Stegman, E. C. 1982. Corn grain yield as influenced by timing of evapotranspiration deficits. *Irrigation Science*. 3 (2):75-87.
173. Stone, L. R.; Schlegel, A. J.; Gwin, R. E.; Kahn, A. H. 1996. Response of corn, grain sorghum, and sunflower to irrigation in the High Plains of Kansas. *Agricultural Water Management*. 30 (3):251-259.
174. Tanner, C. B.; Sinclair, T. R. 1983. Efficient water use in crop production; research or research? *In*: Taylor, H. M.; Jordan, W. R.; Sinclair, T. R. eds. *Limitations to efficient water use in crop production*. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy. pp. 1-27.

175. Tolk, J. A.; Howell, T. A.; Evett, S. R. 1998. Evapotranspiration and yield of corn grown on three high Plains soils. *Agronomy Journal*. 90: 447-454.
176. Tollenaar, M.; Hunter, R. B. 1983. A photoperiod and temperature sensitive period for leaf number in maize. *Crop Science*. 23(3): 457-460.
177. _____.; Lee, A. E. 2002. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Research*. 75: 161-170.
178. Trooien, T. P.; Buschman, L. L.; Sloderbeck, P.; Dhuyvetter, K. C.; Spurgeon, W. E. 1999. Water use efficiency of different maturity corn hybrids and grain sorghum in the central Great Plains. *Journal of Production Agriculture*. 12:377-382.
179. Tsai, C. Y.; Huber, D. M.; Warren, H. L. 1978. Relationship of the kernel sink for N to maize productivity. *Crop Science*. 18: 399-404.
180. Uhart, S. A. 2010. Maíz; manejo para ambientes subtropicales con estrés hídrico y térmico. *In*: Congreso Nacional de Maíz (9º., 2010, Rosario, Santa Fe, Argentina). Actas. Buenos Aires, s.e. pp. 31-33.
181. Vallone, P.; Gudjel, V.; Pochettino, A.; Segura, L. 2003. Potencial de rendimiento de maíz sin restricciones hídricas ni nutricionales. INTA Marcos Juárez. *Información para Extensión*. 80:35-37.
182. _____.; _____.; Glarza, C.; Masiero, B.; Ferreira, L.; Canale, A. 2011. Ensayo de densidad y distancia de siembra de maíz. (en línea). Marcos Juárez, INTA. pp. 11-13 (Informe de Actualización Técnica. no. 19). Consultado 27 set. 2015. Disponible en http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-ensayo_de_densidad_y_distancia_de_siembra_de_mai.pdf
183. van Ittersum, M. K.; Rabbinge, R. 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. (en línea). *Field Crops Research*. 52: 197-208. Consultado 28 set. 2015. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429097000373>
184. Vaux, H. J. Jr.; Pruitt, W. O. 1983. Crop-water production functions. *In*: Hillel, D. ed. *Advances in irrigation*. New York, Academic Press. pp. 61-97.

185. Waddington, R.; Edmeades, G. O.; Chapman, C.; Barreto, H. J. 1994. Where to with agricultural research for drought-prone maize environments? *In*: Eastern and Southern Africa Regional Maize Conference (4th., Harare, Zimbabwe). Proceedings. Causeway, Harare, Zimbabwe, s.e. pp. 129-151.
186. Westgate, M. E.; Boyer, J. S. 1985. Carbohydrate reserves and productive development at low leaf water potential in maize. *Crop Science*. 25:762-769.
187. _____.; Thomson Grant, D. 1989. Water deficits and reproduction in maize: Response of the reproductive tissue to water deficits at anthesis and mid-grain fill. *Plant Physiology*. 91:862-867.
188. _____. 1994. Water status and development of the maize endosperm and embryo during drought. *Crop Science*. 34: 76-83.
189. Wu, L. C.; Wang, T. G.; Ku, L. X.; Huang, Q. C.; Sun, Z. H.; Xia, Z. L.; Chen, Y. H. 2008. Determination of the photoperiod-sensitive inductive phase in maize with leaf numbers and morphologies of stem apical meristem. (en línea). *Agricultural Sciences in China*. 7(5): 554-560. Consultado 10 jun. 2015. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1671292708600528>
190. Zinselmeier, C.; Westgate, M. E.; Schussler, J. R.; Jones, R. 1995. Low water potential disrupts carbohydrate metabolism in maize (*Zea mays*) ovaries. (en línea). *Plant Physiology*. 107: 385-391. Consultado 17 ago. 2015. Disponible en <http://www.plantphysiol.org/content/107/2/385.full.pdf>