

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

MAÍZ, EFECTO DE DIFERENTES ESTRATEGIAS DE MANEJO DEL AGUA DE
RIEGO SOBRE EL RENDIMIENTO EN GRANO

por

Santiago Daniel ALCORTA COLOMER
Facundo Manuel PESSANO RUIBAL
Vittorio PRADERIO PAVANELLO

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

MONTEVIDEO
URUGUAY
2016

Tesis aprobada por:

Director:

.....

Ing. Agr. Luis Giménez

.....

Ing. Agr. Lucía Puppo

.....

Ing. Agr. Oswaldo Ernst

Fecha: 24 de noviembre de 2016

Autores:

.....

Santiago Daniel Alcorta Colomer

.....

Facundo Manuel Pessano Ruibal

.....

Vittorio Praderio Pavanello

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a nuestras familias, quienes nos brindaron apoyo incondicional durante todos estos años.

Agradecer a los amigos que nos acompañaron y colaboraron, formando parte de este trabajo. A nuestro tutor de tesis Ing. Agr. MSc. Luis Giménez por permitirnos desarrollar este trabajo y a la Lic. Sully Toledo por la colaboración en la realización del presente documento.

A los amigos que conocimos a lo largo de la carrera, en especial a la generación EEMAC 2013 donde tenemos muchos recuerdos y lazos que quedarán en nuestras memorias.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
<u>1.INTRODUCCIÓN</u>	1
<u>2.REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1. CARACTERÍSTICAS ECO-FISIOLÓGICAS DEL MAÍZ.....	3
2.2. RENDIMIENTOS COMERCIALES Y POTENCIALES.....	4
2.3. COMPONENTES DEL RENDIMIENTO.....	5
2.4. DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO.....	6
2.4.1. <u>Número de granos por superficie</u>	6
2.4.2. <u>Peso de granos</u>	7
2.5. CARACTERIZACIÓN AGROCLIMÁTICA DEL URUGUAY.....	8
2.5.1. <u>Temperatura</u>	8
2.5.2. <u>Precipitaciones</u>	8
2.5.3. <u>Demanda atmosférica</u>	9
2.5.4. <u>Agua disponible</u>	10
2.6. REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DEL MAÍZ.....	11
2.6.1. <u>Estimación de la demanda hídrica</u>	11
2.6.2. <u>Consumo de agua</u>	12
2.7. EFECTO DE LAS DEFICIENCIAS HÍDRICAS EN DIFERENTES ETAPAS DEL CULTIVO.....	13
2.7.1. <u>Etapas vegetativa</u>	14
2.7.2. <u>Entorno de la floración</u>	15
2.7.3. <u>Llenado de grano</u>	16
2.8. EL RIEGO EN EL CULTIVO DE MAÍZ.....	17
2.8.1. <u>Eficiencia de uso del agua</u>	18
2.8.2. <u>Riego deficitario</u>	19
<u>3. MATERIALES Y MÉTODOS</u>	23
3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO.....	23

3.1.1. <u>Manejo experimental</u>	23
3.1.2. <u>Tratamientos</u>	24
3.2 DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO	25
3.2.1. <u>Hipótesis biológicas</u>	25
3.2.2. <u>Hipótesis estadísticas</u>	25
3.2.3. <u>Diseño experimental</u>	26
3.3. DETERMINACIONES REALIZADAS.....	26
3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	26
3.5. CONDICIONES CLIMÁTICAS EN EL PERÍODO DEL CULTIVO	27
3.5.1. <u>Precipitaciones</u>	27
3.5.2. <u>Radiación solar</u>	28
3.5.3. <u>Aportes hídricos y evolución del contenido de agua del suelo</u>	29
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	35
4.1. EFECTO DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA SOBRE EL RENDIMIENTO	35
4.1.1. <u>Efecto de la disponibilidad hídrica sobre los componentes del rendimiento</u>	39
4.1.2. <u>Tasa de crecimiento de cultivo durante el PC de determinación del rendimiento</u>	42
4.2. EVAPOTRANSPIRACIÓN Y EFICIENCIA DE USO DEL AGUA	44
4.2.1. <u>Evapotranspiración</u>	44
4.2.2. <u>Eficiencia de uso del agua</u>	45
4.3. INTERACCIÓN DE LAS VARIABLES CON EL RENDIMIENTO.....	46
5. <u>CONCLUSIONES</u>	48
6. <u>RESUMEN</u>	49
7. <u>SUMMARY</u>	50
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	51

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Características hidrológicas del suelo	23
2. Evapotranspiración del cultivo, precipitaciones totales, precipitación efectiva, riego total, riego efectivo y agua efectiva para los diferentes tratamientos evaluados.....	38
3. Número de granos por m ² , número de granos por espiga, número de espigas por planta y peso de 1000 granos para los tratamientos evaluados.....	39
Figura No.	
1. Precipitaciones (mm) ocurridas durante la zafra 2013 – 2014 y promedio de la serie histórica 1961 a 2009	28
2. Radiación solar incidente promedio mensual para el período 2002 – 2012 y para la zafra 2013 – 2014.....	29
3. Evolución del contenido de agua del suelo, precipitaciones y riego para el tratamiento con bienestar hídrico (T1)	30
4. Evolución del contenido de agua del suelo, precipitaciones y riego para el tratamiento con bienestar hídrico en PC (T2)	31
5. Evolución del contenido de agua del suelo, precipitaciones y riego para el tratamiento con bienestar hídrico en PC y llenado de grano (T3)	32
6. Evolución del contenido de agua del suelo, precipitaciones y riego para el tratamiento con riego deficitario (T4)	33
7. Evolución del contenido de agua del suelo y precipitaciones para el tratamiento en secano (T5)	34

8. Rendimiento en grano en los diferentes tratamientos evaluados.	35
9. Radiación solar incidente diaria promedio mensual (MJ m ⁻² día ⁻²) para el período de noviembre a febrero para las temporadas 2009, 2010 y 2013	36
10. Relación entre el rendimiento en grano (kg ha ⁻¹) y el número de granos (granos m ⁻²) discriminados según los tratamientos evaluados.....	40
11. Relación entre el rendimiento en grano (kg ha ⁻¹) y el peso de los 1000 granos para los tratamientos evaluados	42
12. Tasa de crecimiento de cultivo durante el período crítico (kg MS ha ⁻¹ d ⁻¹) en función de los tratamientos evaluados.....	43
13. Evolución de la evapotranspiración del cultivo mensual.....	44

1. INTRODUCCIÓN

En la última década la agricultura a nivel nacional ha experimentado un importante aumento en área, fenómeno que también se da en el cultivo de maíz que pasó de 49.000 ha sembradas en 2005-06 a 123.000 ha en 2012-13 (MGAP. DIEA, 2014). A pesar de la incorporación de nuevas tecnologías que han acompañado este incremento en área de siembra de maíz los rendimientos se mantienen bajos en términos promedio pero con gran variabilidad según el año. Giménez (2012b), Sawchik (2012) coinciden en que la gran limitante para los cultivos de verano es la disponibilidad hídrica.

El régimen de precipitaciones en Uruguay se clasifica como isohigro y presenta como característica principal una elevada variabilidad intra-anual, por lo que es altamente probable que en cualquier momento del año se generen déficits o excesos hídricos, originándose los primeros gracias a la variabilidad de los eventos de precipitaciones y no a la falta de los mismos (Castaño et al., 2011).

Por otra parte, los valores de evapotranspiración de referencia (ET_o) no presentan gran variabilidad, siendo entre 1000 y 1600 mm los promedios anuales, con un máximo en verano que varía entre 160 y 185mm por mes y un mínimo en invierno de 25-35 mm por mes (Sawchik, 2012).

A la variabilidad de las precipitaciones y las altas ET del verano se les suma la baja capacidad de almacenaje de agua de los suelos que oscila para la mayoría de los casos entre 60-180 mm de agua disponible (AD, Molfino y Califra, 2001), esto representa en el mejor de los casos aproximadamente un tercio a un cuarto de las necesidades de agua de un cultivo de maíz de alto potencial (Sawchik et al., 2010).

Las características anteriormente mencionadas determinan que, para obtener rendimientos estables y cercanos a los potenciales, se debe necesariamente implementar riego suplementario en la mayoría de los años para mitigar los déficits hídricos que se generan en los meses del verano.

García Petillo (2012) indicó que el Uruguay se encuentra en un momento de inflexión en lo que respecta a la inclusión del riego en los cultivos de verano, principalmente en maíz, soja y sorgo, y en los cultivos forrajeros. En efecto, en los últimos años el crecimiento de esta práctica en sistemas de producción agrícolas, ha sido exponencial. El incremento del precio de la tierra y de los insumos han sido determinante para hacer rentable la inclusión del riego en los sistemas de producción agrícolas, lecheros y agrícola-ganaderos intensivos.

Sin embargo, este crecimiento en las áreas regadas no ha sido acompañado en similar medida por la formación de técnicos y productores en los conceptos básicos para el diseño y la operación del riego, todo lo cual se traduce en muy bajas eficiencias del riego, y por lo tanto en una respuesta marginal de los cultivos (García Petillo, 2012). A nivel mundial la escasez de agua ha provocado, crecientes regulaciones que afectan el uso de agua para riego y exigencias a productores por una mayor eficiencia en el uso de la misma (Payero et al., 2009).

En cuanto a la respuesta del maíz al riego, Andrade y Gardiol (1995) indican que el momento en que se proporciona el riego es un punto crítico para maximizar el rendimiento. La información sobre el efecto de diferentes estrategias de aplicación del riego sobre el rendimiento de maíz bajo las condiciones agro-climáticas del país es escasa. Por tal motivo, este trabajo tiene por objetivo evaluar los efectos sobre el rendimiento en grano de diferentes estrategias de manejo del agua de riego en maíz.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. CARACTERÍSTICAS ECO-FISIOLÓGICAS DEL MAÍZ

El maíz es una especie de tipo fotosintético C4 con elevados potenciales de producción de biomasa y rendimiento (Andrade et al., 1996). Éstas, al tener separado espacialmente la absorción de la fijación de CO₂, logran tasas fotosintéticas netas muy superiores (30 a 40%) a las especies C3, especialmente ante déficit hídricos y condiciones de baja conductancia estomática (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

El tiempo real que demora el cultivo de maíz en alcanzar un estadio de desarrollo no es constante, y en general se cumplen más rápido a mayores temperaturas. Sin embargo, la respuesta de la tasa de desarrollo a la temperatura es aproximadamente lineal dentro de un rango de temperaturas determinado por una temperatura base y una temperatura óptima. En los maíces de regiones templadas la temperatura base se encuentra en el entorno de los 8°C. Por lo tanto, al expresar la duración de las etapas en grados día las diferencias en el tiempo requerido para alcanzar un determinado estadio de desarrollo desaparecen (Ritchie y NeSmith, 1991).

El maíz es insensible al fotoperíodo (horas de luz) en su fase juvenil pero alcanzado cierto grado de desarrollo presenta una respuesta cuantitativa de día corto durante el resto de la etapa vegetativa (fase inductiva), lo cual implica que su ciclo se alargue (demorando la iniciación reproductiva del ápice) al alargarse la duración del día, respuesta que generalmente se ve enmascarada por el efecto contrario de las temperaturas pero se pone en evidencia al expresar la duración de las etapas fenológicas en tiempo térmico. Dicha respuesta al fotoperíodo se da con horas de luz superiores a 12 – 13 hs por día. Luego de la diferenciación del ápice el fotoperíodo no ejerce ningún efecto sobre el desarrollo (Kiniry et al., citados por Cárcova et al., 2003).

Para estudiar las etapas fenológicas del cultivo de maíz se utilizan escalas que relacionan aspectos externos claramente identificables con estructuras internas más difíciles de identificar. Una de las más comunes es la de Ritchie y Hanway (1982); en la cual se distinguen dos grandes periodos: vegetativo y reproductivo.

En el estado vegetativo el cultivo determina el índice de área foliar (IAF; definido como el área de hoja por superficie de terreno) con el que va a contar durante la etapa reproductiva, lo cual determinará en gran medida la capacidad de interceptar la radiación solar incidente (RS incidente). En el entorno de la floración femenina queda definido el máximo IAF y la altura máxima de la planta (Ritchie y Hanway, 1982).

En maíz, al igual que en la mayoría de los cultivos, existe una estrecha relación entre el rendimiento y la producción de biomasa aérea, la cual depende de la cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el canopeo (Cárcova et al., 2003). Tanto el desarrollo como la permanencia del área foliar dependen principalmente del AD en el suelo (Plaut et al., 1969).

El estado reproductivo comienza en el estadio R1, donde se realiza la fecundación, sin embargo, el número final de granos por planta puede disminuir durante el período de cuaje (R2) que se extiende de 10 a 20 días después de R1 y se produce la división de células del endosperma (Cirilo y Andrade, 1994). En R3 (grano lechoso) la división celular del endosperma está esencialmente terminada, por lo que el crecimiento es debido principalmente a la expansión celular y la acumulación de almidón en las células. Aunque no tan severo como en R1, las deficiencias hídricas en R3 pueden tener un profundo efecto negativo en el rendimiento, reduciendo ambos componentes del rendimiento (número y peso de los granos, Fassio et al., 1998). Durante los estadios R4 (grano pastoso) y R5 (grano duro) continúa la acumulación de almidón en el endosperma hasta llegar a madurez fisiológica (Cárcova et al., 2003).

2.2. RENDIMIENTOS COMERCIALES Y POTENCIALES

Se define como rendimiento potencial a aquel que para cada especie se obtiene en un ambiente dado en ausencia de estreses abióticos y bióticos. En estas condiciones, el rendimiento depende de la capacidad de fijar carbono a través de la fotosíntesis, la cual estará regulada por la cantidad de radiación que el cultivo sea capaz de interceptar (Otegui, 2009) y la eficiencia con que es utilizada (Cárcova et al., 2003). Entonces, el rendimiento potencial es el mayor rendimiento que se puede obtener en un ambiente de producción con determinado genotipo, y se encuentra determinado por factores no modificables del ambiente como la radiación solar, las temperaturas y los suelos, así como también por factores de manejo modificables como el arreglo espacial y la fecha de siembra. En Uruguay el rendimiento potencial del maíz oscila entre 13 y 15 toneladas por hectárea (Giménez, 2012a).

Por otro lado, el rendimiento realmente alcanzable en secano se encuentra afectado por factores limitantes como la disponibilidad de agua y nutrientes y por factores reductores del rendimiento como los daños causados por plagas, malezas y enfermedades (Giménez, 2012a).

Dado que a nivel productivo se siembra principalmente en condiciones de secano los rendimientos están muy alejados de los potenciales para la región,

presentando además gran variabilidad (Piedrabuena, 2010). Al observar la información sobre los rendimientos promedios nacionales para las zafas 2000-01 hasta 2012-13 (MGAP. DIEA, 2014) se observan rendimientos desde 3085 kg ha⁻¹ en el año 2008-09 hasta 5757 kg ha⁻¹ en el año 2006-07 siendo el promedio para la serie 4422 kg ha⁻¹. Cuando además se observan las precipitaciones acumuladas de noviembre a febrero de cada año de la serie (INIA. GRAS, 2013) se puede ver que en los años donde las precipitaciones estivales son mayores los rendimientos obtenidos también son mayores.

2.3. COMPONENTES DEL RENDIMIENTO

El rendimiento de maíz puede ser estudiado a través de sus componentes numéricos: el número de granos (NG) por unidad de superficie y el peso de grano. A su vez, el NG es producto del número de plantas por unidad de superficie, del número de espigas granadas por planta y del número de granos por espiga. El peso del grano, por su parte, es función de la duración del período de llenado y de la tasa de llenado (g día⁻¹) (Andrade et al. 1999, Cárcova et al. 2003).

El rendimiento está más asociado al número de granos m⁻² que al peso de los mismos (NeSmith y Ritchie 1992a, Otegui et al. 1995, Cárcova et al. 2003). Diversos autores (Cirilo y Andrade 1994, Otegui y Melón 1997, Otegui y Andrade 2000) han señalado que para lograr aumentos de rendimiento es más importante aumentar la supervivencia de las estructuras capaces de generar grano que el número potencial, ya que los primeros son más afectados por las condiciones ambientales que el número de espiguillas diferenciadas.

A su vez, el maíz presenta una escasa capacidad para compensar un bajo NG con mayor peso de los mismos. Esta poca plasticidad en el peso de los granos torna más crítica la etapa en la cual se determina el NG (Andrade et al., 2002).

Además, el NG fijados por planta determina en gran medida la relación fuente-fosa para el período de llenado de grano y podría afectar el peso de los granos (Maddonni et al., 1998).

2.4. DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO

Diversos trabajos identificaron a la etapa de crecimiento del maíz en la que el rendimiento es más susceptible a cualquier tipo de estrés al período de 30 días centrado en floración femenina (Tollenaar y Daynard 1978, Fischer y Palmer 1984, Kiniry y Ritchie 1985, Cirilo y Andrade 1994). Por ese motivo se definió a esta etapa como el período crítico (PC) de determinación del rendimiento (Cárcova et al., 2003). Estos últimos autores afirman que el maíz debe ser manejado de forma tal que alcance en esta etapa un estado fisiológico óptimo, es decir, alta tasa de crecimiento (TC) y elevada partición a espigas de los asimilados disponibles. El cultivo debe estar sano, libre de malezas y bien provisto de agua y nutrientes, para poder maximizar durante esa etapa la interceptación de radiación, la eficiencia de conversión de radiación interceptada en biomasa y la partición de biomasa a estructuras reproductivas.

2.4.1. Número de granos por superficie

El número de granos m^{-2} está asociado con el número de espigas m^{-2} y al número de granos espiga⁻¹ a cosecha (Cirilo y Andrade, 1994), lo cual es función de la condición fisiológica del cultivo durante el PC (Andrade et al., 1999). Andrade et al. (1996) obtuvieron una buena correlación entre el NG planta⁻¹ y la cantidad de radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada durante el PC. A pesar de ello la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) en torno a la floración es el mejor indicador de la condición fisiológica de las mismas y por lo tanto de su capacidad de fijar granos. Por este motivo, es la mejor variable para estudiar la fijación de granos (Tollenaar et al. 1992, Andrade et al. 1999, Vega et al. 2001). Otegui y Bonhomme (1998) determinaron que el ambiente en prefloración define el número potencial de granos, así como también la fertilidad de la espiga sub apical, pero el NG fijados efectivamente dependerá de las condiciones en posteriores a la floración y las características del híbrido como prolificidad y tamaño de la espiga. La disminución en el NG viables puede continuar hasta dos o tres semanas después de la floración (Tollenaar 1977, Fischer y Palmer 1984, Cirilo y Andrade 1994).

Según Andrade et al. (1999) alcanzar determinados valores de TCP en el PC es fundamental para lograr un flujo adecuado de asimilados a la espiga. En tal sentido expresa que la máxima partición de asimilados a la espiga se dio con TCP entre 2 y 3 $g d^{-1}$. A TCP menores la partición de materia seca (MS) a la espiga disminuye debido a

que la espiga es una fosa débil en la planta en floración, debido a su ubicación axilar sujeta a dominancia apical. Con valores de TCP mayores a 6 g d^{-1} la primer espiga no mostró respuesta, debido a la limitante morfogénica de la espiga, pasando a fijar granos en la segunda espiga. En concordancia con esto Andrade et al. (1996) determinaron que TCP promedio inferiores a 1 g día^{-1} produce solo plantas estériles, mientras que con TCP promedio superiores a 7 g día^{-1} presenta prolificidad; esta información es consistente con la presentada por Vega et al. (2001). Además, expresan que un aumento en la TCP en pos-floración entre 2 y 4 g día^{-1} , produce un aumento de alrededor de 200 granos en la espiga; sin embargo, incrementos en dicha tasa por encima de 4 g día^{-1} no producen aumentos importantes en el número de granos por espiga.

2.4.2. Peso de granos

El peso del grano se genera durante el llenado de grano, etapa que comienza a partir de la fecundación y que se divide en dos fases, la fase lag (período formativo) y la fase de llenado efectivo (Cárcova et al., 2003). Las condiciones ambientales pueden afectar la acumulación de biomasa en el grano en ambas fases (Maddonni et al., 1998).

La fase lag es un período formativo de lenta acumulación de biomasa en el grano durante el cual se establece el número de células endoespermáticas y comienzan a formarse los posibles lugares para la deposición de almidón (Reddy y Daynard 1983, Jones et al. 1996). Esta etapa donde se fija la capacidad fosa del grano comienza después de la fecundación del ovario y se extiende aproximadamente por tres semanas post-floración femenina, se superpone en parte con el crecimiento de la espiga y la fijación de los granos (Cirilo y Andrade 1994, Cirilo y Andrade 1996, Otegui y Bonhomme 1998). En esta primer etapa del llenado de grano se define gran parte del peso final de los mismos ya que la TC de los granos durante la etapa de llenado efectivo depende en gran medida de la cantidad de células endoespermáticas diferenciadas durante la fase lag (Maddonni et al., 1998)

Durante la fase de llenado efectivo ocurre más del 80% del incremento en peso y se depositan los principales componentes del grano, esta etapa es muy dependiente de las temperaturas y la disponibilidad de asimilados (Cirilo y Andrade, 1996). Las diferencias en el peso final de grano pueden ser explicadas por el largo del período de llenado efectivo y/o la tasa de acumulación de MS durante esta etapa. Un estrés generado en esta etapa reduciría el peso de los granos (Thompson, 1986).

Maddonni et al. (1998) establecen que la movilización de reservas al grano cobra mayor importancia cuando hay un elevado NG de menor tamaño por planta que cuando hay un bajo NG de mayor tamaño, en este último caso la movilización de

reservas puede hacerse hacia otros órganos como chalas, marlo y raquis, convirtiéndose estos en una fosa que compite con los granos. En el mismo sentido establecen que en las condiciones donde hay un gran NG la disponibilidad de asimilados por grano podría estar limitando la expresión del peso potencial de los mismos. A pesar de ser el peso de los granos el componente más estable, existe una relación negativa entre el número de granos por planta (NGP) y el peso medio de los mismos a madurez fisiológica cuando se analiza un amplio rango de NGP (Cárcova et al., 2003).

2.5. CARACTERIZACIÓN AGROCLIMÁTICA DEL URUGUAY

La planificación y evaluación del potencial productivo y riesgos climáticos asociados a la producción agropecuaria requiere el disponer de una caracterización agroclimática en base a registros históricos, que contribuya a la definición de áreas con un comportamiento homogéneo esperado para las actividades productivas (Castaño et al., 2011).

2.5.1. Temperatura

La temperatura media anual sobre Uruguay es de unos 17,5 °C, variando desde unos 19,8 °C en la zona noroeste (Bella Unión), hasta unos 16,6 °C en la costa sur del país. Las isotermas tienen una tendencia incremental general desde el sur hacia el noroeste (Castaño et al., 2011).

2.5.2. Precipitaciones

El régimen de precipitaciones del país se clasifica como isohigro y presenta volúmenes anuales promedios entre 1000 mm y 1600 mm, presentando como característica principal una elevada variabilidad intra-anual por lo que en cualquier época del año puede haber déficits o excesos de precipitaciones (Genta y Texeira 2001, Castaño et al. 2011).

Considerando los valores acumulados de la lluvia a través del año, no existe ni una estación seca ni una estación lluviosa bien definida, registrándose acumulados medios mensuales entre 60 mm/mes (litoral oeste en invierno) y 140 mm/mes (noroeste en abril y octubre). De todas formas, los valores mensuales de precipitación registrados en un año particular, se pueden apartar considerablemente de estos promedios dada la gran variabilidad interanual (Castaño et al., 2011).

En los años extremos se pueden observar valores mínimos inferiores a 20 mm/mes y máximos superiores en todos los meses a los 250 mm/mes. Al analizar la serie en su conjunto, se constata que en los años menos lluviosos las precipitaciones mensuales fueron mayormente inferiores a 60-80 mm, mientras que los años más lluviosos fueron en general mayores a 120-160 mm (Castaño et al., 2011).

Entre los meses de noviembre y febrero se presenta en general deficiencias hídricas, durante dicho período las precipitaciones promedio no son suficientes para cumplir las necesidades de los cultivos de verano. Por otra parte, ocurre un período de excesos hídricos durante invierno y comienzos de primavera, período clave ya que de él depende la acumulación de agua en el perfil del suelo para las primeras etapas de los cultivos de verano (Corsi, 1982), esto pierde importancia para etapas más avanzadas de los cultivos debido a la baja capacidad de almacenaje de los suelos (Molfino y Califra, 2001).

2.5.3. Demanda atmosférica

Para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del cultivo, y de las prácticas de manejo se utiliza el concepto de evapotranspiración de referencia o evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o). La tasa de ET_o corresponde a la de un cultivo hipotético de pasto con características específicas sin restricciones hídricas. Así los únicos factores que afectan la ET_o son los parámetros climáticos. Por lo tanto, la ET_o es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. La ET_o expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo. Desde este punto de vista, el método FAO Penman-Monteith se recomienda como el método de determinación de la ET_o. Este método ha sido seleccionado debido a que aproxima de una manera cercana la ET_o de cualquier localidad evaluada, tiene bases físicas sólidas e incorpora explícitamente parámetros fisiológicos y aerodinámicos (Allen et al., 2006).

De este modo, los valores medios de ETo acumulada anual estimada por el método de Penman-Monteith se sitúan entre 1000 y 1200 mm. La ETo presenta un claro comportamiento estacional registrándose los valores más altos durante el verano (160-185 mm/mes), seguido de la primavera (95-105 mm/mes), el otoño (65-80 mm/mes) y el invierno (25-35 mm/mes). La ETo se caracteriza por su baja variabilidad interanual, la cual es un poco más alta durante el verano con 40 a 50 mm de diferencia entre los extremos (Castaño et al., 2011).

2.5.4. Agua disponible

El balance de agua de un suelo donde crece un cultivo, resulta de las diferencias entre los ingresos y los egresos de agua del suelo. Los ingresos pueden provenir de las precipitaciones, el riego, la napa freática y de la escorrentía superficial. Los egresos se producen por la evaporación de agua del suelo, la transpiración del cultivo, la escorrentía hacia áreas topográficas más bajas y el drenaje hacia zonas más profundas que las que exploran las raíces (Dardanelli et al., 2003).

La disponibilidad de agua en el suelo se refiere a la capacidad de un suelo de retener el AD para las plantas. Se refiere al agua almacenada entre contenidos de agua del suelo denominados capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP). El primero es el agua que queda retenida en contra de las fuerzas gravitatorias en los microporos del suelo luego de drenar completamente después de una lluvia o riego, es la cantidad máxima de agua que puede retener un suelo. A medida que el cultivo consume agua y el contenido en el suelo va disminuyendo, el agua remanente será retenida con mayor fuerza por las partículas del suelo, lo que hará más difícil su extracción por parte de las plantas hasta llegar un momento en el cuál la fuerza de retención será tal que la extracción por el cultivo será nula y se habrá alcanzado el PMP (Allen et al., 2006).

La capacidad de almacenar agua de los suelos del país presenta una alta variabilidad, con zonas de suelos superficiales con capacidad inferior a 30 mm y zonas de suelos profundos con capacidad superior a 170 mm (Molfino y Califra, 2001).

Los suelos presentan menor contenido de agua desde el inicio de primavera hasta el inicio del otoño, con valores más bajos durante los meses del verano. Esta

situación es consecuencia de que se registra mayor evapotranspiración que precipitación durante esta época. Esto indicaría que en promedio para este mes los valores de porcentaje de agua disponible (PAD) se sitúan por debajo de los umbrales críticos para cultivos extensivos y en algunas zonas también para pasturas (50 - 60% y 30 - 40% respectivamente, Castaño et al., 2011).

2.6. REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DEL MAÍZ

2.6.1. Estimación de la demanda hídrica

La evapotranspiración se refiere a dos procesos que ocurren simultáneamente: evaporación desde la superficie del suelo y transpiración por la planta. El concepto de evapotranspiración incluye tres definiciones: la E_{To} , la evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar (E_{Tc}), y la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (E_{Tr}). La E_{To} fue explicada anteriormente, la E_{Tc} está relacionada con las características del cultivo y se refiere a un cultivo que crece en condiciones óptimas, mientras tanto la E_{Tr} representa una corrección de la anterior cuando no existe un manejo óptimo (Allen et al., 2006).

La E_{Tc} será diferente de la E_{To} en la medida que sus características de cobertura del suelo, propiedades de la vegetación y otras variables sean también diferentes a las del cultivo de referencia. Estos efectos están incorporados en el coeficiente del cultivo (K_c). De manera que la E_{Tc} se obtiene multiplicando la E_{To} por el K_c (Allen et al., 2006).

Durante las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa desde el suelo (E_s), pero con el desarrollo del cultivo y una vez que este cubre el suelo el proceso dominante es la transpiración, pasando a ser el 90 % de la ET (Allen et al., 2006). Por otra parte, Otegui (1992) indica que en Balcarce aproximadamente 395 mm son transpirados y 150 mm evaporados en siembras de octubre ($E_s = 38\%$), mientras que en siembras de noviembre 306 mm son transpirados y 94 mm evaporados ($E_s = 31\%$). Por lo tanto, la ET varía según (i) las condiciones climáticas, (ii) factores inherentes al cultivo, y (iii) manejo y condiciones ambientales (Sawchik, 2012).

2.6.2. Consumo de agua

La producción de maíz se desarrolla bajo una amplia gama de condiciones climáticas, sin embargo, la superficie destinada al cultivo se concentra en donde las precipitaciones superan los 250 mm al año, no se desarrolla el cultivo en secano cuando las precipitaciones estivales no superan los 150 mm (Shaw, citado por Andrade et al., 1996). La cantidad total de agua consumida por un cultivo varía entre años y regiones, estas variaciones dependen de la demanda atmosférica, la duración del ciclo del cultivo y del área foliar que éste desarrolla (Andriani, 2002).

Giménez (2012a) estudiando el consumo de agua de sorgo, soja y maíz determinó que este último es el que presentaba los mayores consumos hídricos. Los requerimientos de agua del maíz son variables en las diferentes etapas de su ciclo productivo. Estas necesidades se incrementan progresivamente desde emergencia hasta el estadio de 9 - 10 hojas, para llegar al máximo de necesidades diarias desde este estadio hasta principio de espigazón.

Çakir (2004) en Turquía, obtuvo resultados de evapotranspiración de maíz sin limitantes entre 700 y 800 mm. En Balcarce y Pergamino, Argentina, sin limitantes hídricas y nutricionales, diferentes autores obtuvieron valores de evapotranspiración entre 500 y 600 mm (Otegui 1992, Andrade y Gardiol 1995).

Nagore et al. (2013) estimaron la evapotranspiración para tres híbridos en Balcarce Argentina y obtuvieron valores similares, siendo el promedio 646 mm en el tratamiento de riego. También en Argentina Rivetti (2007) en cultivos que cumplieron su ciclo en 138 días, la cantidad de agua aplicada varió entre 360 y 300 mm y el agua total consumida en el ciclo del cultivo fue de 575 mm \pm 15.

A nivel nacional, Giménez (2012a) determinó la ETc para las diferentes etapas del ciclo en años contrastantes, siendo aproximadamente de 600 y 460 mm para años “Niña” y “Niño” respectivamente. En el mismo trabajo se evidenció que durante el PC se consume entre el 38 y 40 % del total del ciclo.

Giménez y García (2011) estudiando la ETc y la ETr en regiones contrastantes del Uruguay encontraron que en la localidad de Colonia, que presenta menores temperaturas pero ciclos más largos, se hallaron los mayores valores de ETc (672 mm). En Salto, al presentar mayores temperaturas, el ciclo fue más corto y la ETc fue menor (536 mm) a pesar de presentar los valores más altos de ETc diarios. La ETr fue igual en ambas localidades (365 mm), esto se debe a que durante la mayoría de los años evaluados se presentaron mayores precipitaciones en Salto. Estos valores evidencian que

los requerimientos hídricos de los cultivos generalmente no son satisfechos con las precipitaciones.

En regiones templadas, los cultivos sembrados en fechas tempranas alcanzan una mayor ETc acumulada, debido a la mayor duración del ciclo de crecimiento y a una mayor ET durante el período de llenado del grano (Andrade et al., 1996).

Singh y Singh (1995), Panda et al. (2004) trabajando con riegos de alta frecuencia encontraron que la absorción se realizaba de las capas superficiales del suelo (0 a 0,5 m). Por otra parte, Gordon et al. (1995), Farré y Faci (2009) trabajando con riego moderado y secano respectivamente, hallaron que la absorción se realizó entre 0 y 0,9 m, disminuyendo hacia 1,2 m. Kang et al. (2000) estudiaron deficiencias leves y moderadas en el periodo vegetativo, siendo estas levantadas antes de floración y no obtuvieron diferencias con el tratamiento de bienestar hídrico en dicha etapa, lo cual justificaron mediante la alta relación raíz/parte aérea que presentaron los tratamientos con déficit.

Farré y Faci (2009) encontraron un menor consumo de agua en el perfil del suelo en los tratamientos donde el cultivo tuvo mayor déficit hídrico temprano en el ciclo, esto se debió a que una deficiencia tan severa hizo que el cultivo fuera incapaz de desarrollar un sistema radicular profundo.

2.7. EFECTO DE LAS DEFICIENCIAS HÍDRICAS EN DIFERENTES ETAPAS DEL CULTIVO

El efecto de las deficiencias hídricas varía con la intensidad, duración y momento en que se produzcan; sin embargo, la etapa de desarrollo en la que ocurren las deficiencias es determinante del rendimiento, porque a una misma intensidad y duración de la deficiencia, el efecto será diferente (García y Ferrarotto, 2009).

Al ser los procesos de transpiración y fijación de CO₂ simultáneos se puede considerar la producción de MS del cultivo en función del agua transpirada (Ta) y de la eficiencia con que es utilizada (EUA) en términos de producción de biomasa, entonces: $B = EUA * Ta$ (Andrade et al., 1996).

Fereres y Soriano (2007), Payero et al. (2009) reportaron una estrecha relación entre el agua consumida por el cultivo y la producción. En tal sentido Shaw (1988), Muchow y Sinclair (1991) afirman que el consumo de agua y por ende el crecimiento se ven reducidos cuando el contenido de agua del suelo en la zona radicular desciende a

valores por debajo de 40-60% del AD dependiendo de las condiciones atmosféricas y la etapa.

Los síntomas visibles del estrés hídrico sobre el maíz son reducción del crecimiento, retraso en la madurez y la reducción de la biomasa y rendimiento del cultivo. Se ha demostrado que el estrés hídrico en el maíz reduce la altura de la planta (Cakir, 2004), índice de área foliar (Traore et al., 2000) y el crecimiento de las raíces (Jama y Ottman, 1993). El rendimiento disminuye al reducirse los componentes del rendimiento, como el número de granos m^{-2} y el peso de los mismos (NeSmith y Ritchie 1992a, Otegui et al. 1995, Pandey et al. 2000).

Diversos autores (NeSmith y Ritchie 1992b, Andrade et al. 1996, Çakir 2004, Giménez 2012b) concuerdan en que el rendimiento de maíz es particularmente sensible a los déficits de agua que coinciden con el período floración masculina - floración femenina, causando reducciones notables en el NG y en el rendimiento. El efecto del estrés es más severo si se produce en estados reproductivos, en parte porque la ETc en ese momento es generalmente la mayor y el estrés puede reducir la ETc más significativamente que cuando la ETc es menor.

El estrés durante etapa vegetativa disminuye la MS total de la planta, que se ha demostrado estar relacionada linealmente con el rendimiento (Howell et al. 1997, Klocke et al. 2004, Payero et al. 2009), limitando el rendimiento potencial temprano en el ciclo de crecimiento del cultivo. Por lo tanto, si el agua es limitada, el estrés debería ser evitado temprano en el ciclo y en especial durante la etapa reproductiva. El estrés tardío en el ciclo (etapa de grano dentado, R5 a madurez, R6), fue cuando menos se afectó el rendimiento (Payero et al., 2009).

2.7.1. Etapa vegetativa

Los déficits disminuyen la expansión foliar y/o aumentan la senescencia, por lo tanto afectan la interceptación de la radiación. Cuando disminuye el área foliar ya sea por menor expansión o por mayor tasa de senescencia, se produce una reducción de la superficie transpiratoria y de la cantidad de radiación interceptada por el cultivo (Otegui, 1992). El maíz posee alta sensibilidad estomática, mayor a la del girasol y a la de soja (Boyer 1970b, Bennett et al. 1987, Andrade y Gardiol 1995).

Si bien el maíz es sensible al estrés hídrico en estado vegetativo, ya que reduce la expansión foliar y la tasa fotosintética y por ende hay un menor crecimiento; si pasado el estrés la planta puede recuperar área foliar antes de llegar al PC y así lograr altas tasas

de crecimiento en dicho período, la disminución del rendimiento va a ser leve o nula (Stegman 1982, Eck 1986, Lorens et al. 1987, Abrecht y Carberry 1993).

Çakir (2004) determinó que deficiencias hídricas en la etapa vegetativa disminuyeron la biomasa total entre un 28 y 32% en relación con los tratamientos con bienestar hídrico durante todo el ciclo, pero no generó diferencias en el rendimiento en grano.

Por otro lado, NeSmith y Ritchie (1992c) afirman que a corto plazo el estrés hídrico en la etapa vegetativa retarda la aparición de las hojas y disminuye la producción de área foliar, mientras que a largo plazo las consecuencias son tamaños de hojas y entrenudos reducidos, retraso en la aparición de la panoja y los estigmas, retraso de 2 a 3 días el inicio del llenado de granos y pérdidas de rendimiento de entre 15 y 25%. Éstos autores atribuyeron la disminución de rendimiento a la reducción del NG formados.

Kang et al. (2000) encontraron que aquellos tratamientos que habían soportado deficiencias hídricas leves (50% AD) y moderadas (40% AD) en etapas tempranas (23 – 43 DPS) fueron menos afectados por un estrés hídrico durante la etapa de elongación del tallo. Y resaltan que en general cuanto más severa es la deficiencia hídrica en la etapa vegetativa temprana menos se inhibe la fotosíntesis en la etapa de elongación del tallo y más rápida será la respuesta cuando se levante la deficiencia.

2.7.2 Entorno de la floración

Alrededor de la floración se producen mermas importantes en el rendimiento en grano pudiendo verse disminuido el índice de cosecha (Sinclair et al., 1990).

El rendimiento final suele relacionarse fuertemente con el IAF a floración. Un estrés hídrico en la floración del maíz reduce la eficiencia de conversión en biomasa de la radiación interceptada, y posiblemente la interceptación de radiación (por aceleración de la senescencia de las hojas) y la partición de asimilados a espigas. Como consecuencia, aumenta el aborto de estructuras reproductivas y disminuye la producción final de grano (Andrade et al., 1996).

La TCC se ve afectada como consecuencia del efecto negativo del déficit hídrico sobre la eficiencia de interceptación y conversión de la radiación. Otegui (1992) notificó que déficits hídricos durante 40 días alrededor de la floración redujeron la TCC 15%. NeSmith y Ritchie (1992b) trabajaron con déficits en pre-antesis con una duración similar y la disminución del rendimiento fue de 63%.

Giménez et al. (2014b) encontraron que las pérdidas de rendimiento en grano por estrés hídrico durante el PC fueron de 40 a 53 % del rendimiento potencial. Cuando las deficiencias se generaron durante la etapa vegetativa y continuaron durante el PC, los rendimientos de maíz disminuyeron entre 44 y 56% en relación al tratamiento sin deficiencias hídricas.

Çakir (2004) trabajando con deficiencias en el PC obtuvo como resultado que un corto déficit al comienzo de dicho período causó reducciones en el rendimiento de 40%, mientras que deficiencias más prolongadas pueden llegar a disminuir hasta un 93% el rendimiento respecto a no sufrir deficiencias hídricas.

Ruiz y Nuñez (s.f.) evaluaron el efecto de un déficit hídrico en torno a floración femenina sobre el rendimiento para dos híbridos, uno catalogado como tolerante y otro como susceptible al déficit hídrico. Estos autores encontraron que los efectos fueron más negativos sobre el material susceptible siendo las mermas de rendimiento respecto al testigo, 0 a 63 % y 4 a 39 % del material susceptible y tolerante respectivamente dependiendo del momento y la severidad.

2.7.3. Llenado de grano

Las deficiencias hídricas durante el llenado de grano reducen la tasa fotosintética y aceleran la senescencia foliar, disminuyendo la asimilación total, presentando reducciones en el rendimiento en el entorno de 21 a 40 % (NeSmith y Ritchie, 1992a). Estos autores concluyen que la importancia del estrés hídrico sobre el rendimiento en esta etapa depende de cuán temprano ocurra el mismo. Giménez et al. (2014b) determinaron que la disminución del rendimiento varió entre 23 y 31 % en la misma etapa debido principalmente a un menor peso de los granos.

Çakir (2004) coincide en que las etapas menos sensibles al déficit hídrico son la etapa vegetativa y a partir de grano lechoso. En tal sentido, los tratamientos con omisión de un solo riego en R3 generaron mermas en el rendimiento que variaron de 15 a 28% dependiendo las precipitaciones de cada año experimental.

2.8. EL RIEGO EN EL CULTIVO DE MAÍZ

La incorporación del riego a los sistemas productivos ayuda a ampliar el rango de gestión del riesgo pudiendo aprovechar mejor las oportunidades sin aumentar la vulnerabilidad. Además, tiene el potencial de reducir la incertidumbre esperada y ampliar las posibilidades de políticas y arreglos que ayuden a paliar las situaciones desfavorables (Baethgen y Terra, 2010).

García Petillo (2012), indicó que regar bien es darle a las plantas la cantidad de agua necesaria en el momento oportuno, es decir, antes que el contenido hídrico del suelo les genere un estrés que disminuya su rendimiento. La cantidad de agua a aplicar o lámina depende, en principio, de los parámetros hídricos del suelo. A los efectos del riego se considera no la totalidad del perfil de suelo, sino que este queda limitado por la masa radicular absorbente.

Allen et al. (2006) establecen que un cultivo sin deficiencia hídrica (riego total o completo) es aquel que crece en un suelo donde el porcentaje de AD en la zona radicular nunca desciende más que la fracción de AD que puede ser agotada antes de presentar estrés hídrico (se reduce la ET), la cual se denomina factor de agotamiento (p). Para el caso del maíz el valor $p=0,55$; es decir que el AD en la zona radicular no puede descender por debajo del 45%. En este sentido Della Magiora et al. (2000) constatan que la ETc se vio fuertemente afectada cuando el contenido de agua en el suelo desciende por debajo del 50% de AD.

Algunos trabajos se han realizado en la región apuntando específicamente al maíz conociendo las características eco-fisiológicas del cultivo y las condiciones climáticas, han planteado diferentes evaluaciones de riego. Rivetti (2006) en Córdoba, Argentina trabajó con niveles hídricos entre 40-60% de AD en el estado vegetativo, en llenado de grano y durante ambas etapas. Los resultados obtenidos arrojan que no hubo diferencias significativas ($p<0.05$) entre los tratamientos de riego.

Farré y Faci (2008) indican que en el contexto del riego, es de mayor relevancia la relación entre rendimiento y agua de riego aplicada que la relación entre rendimiento y la ETc. La limitante del uso de la ETc es en primer lugar que no toda el agua de riego se utiliza en los procesos de evapotranspiración (escorrentía y pérdidas por percolación), y en segundo lugar que una fracción de la ETc proviene de fuentes distintas de riego (agua almacenada en el suelo y precipitación efectiva). Por otra parte, la relación entre el rendimiento y el agua de riego aplicada (Y-I) puede ayudar a evaluar la productividad de riego en sistemas agrícolas (Tolk y Howell, 2003). Por estas razones la relación Y-I

es a menudo más conveniente para estudiar la eficiencia en el uso del agua de riego (Farré y Faci, 2008).

2.8.1. Eficiencia de uso del agua

La eficiencia de uso del agua (EUA) relaciona la producción (biomasa o grano) según la evapotranspiración o agua consumida en el ciclo del cultivo. Los valores de EUA para cada cultivo no son constantes, sino que pueden variar ante deficiencias hídricas y ante variaciones en el déficit de presión de vapor (Otegui et al., 1995). La EUA varía entre especies (tipo de metabolismo y composición de biomasa) y entre climas, dado que estos condicionan la demanda atmosférica (Faraldo et al., 2011).

Por el tipo de metabolismo y el bajo contenido energético de su biomasa reproductiva el maíz presenta la mayor EUA y EUR en términos de producción de granos, con respecto al girasol y la soja, en condiciones de buena disponibilidad hídrica (Faraldo et al., 2011). Así, Andrade y Gardiol (1995) afirman que la EUA calculada como cociente entre el rendimiento en grano y la evapotranspiración de referencia es casi el doble para el maíz que para la soja y el girasol. Hattendorf et al. (1988) determinaron valores de EUA que varían entre 10 y 24 kg ha⁻¹ mm⁻¹ para maíz, de 5 a 9 kg ha⁻¹ mm⁻¹ para girasol y de 5 a 11 kg ha⁻¹ mm⁻¹ para la soja. En los tres cultivos coincidieron temporalmente las menores EUA con las menores EUR, concordando con lo expresado por Earl y Davies (2003).

Según Faraldo et al. (2011) la ocurrencia de lluvias en coincidencia con el PC de los cultivos parece ser la característica de mayor influencia en la EUA y EUR, en zonas donde el agua es un recurso limitante, sobre todo cuando se trata de cultivos estivales, generalmente sometidos a altas demandas atmosféricas.

Para Trout (2012) el mantenimiento de la agricultura con riego requerirá de aumentos en la productividad del agua, y obtuvo que la EUAR aumentó desde aproximadamente 30 kg mm⁻¹ ha⁻¹ bajo riego completo a 50 kg mm⁻¹ ha⁻¹ cuando el riego se redujo en un 50%, e indica que la productividad marginal del agua de riego aplicada (rendimiento adicional por unidad de agua adicional) tiende a ser baja cuando se trata de riego completo, y en la medida que el déficit de agua aumenta la mayor productividad marginal resulta de una mayor eficiencia de las aplicaciones de agua.

En un estudio realizado por Zwart y Bastiaanssen (2004) donde revisaron valores de EUA en la bibliografía a nivel mundial encontraron que el valor promedio para maíz se encuentra en $18 \text{ kg mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ y los valores de EUA mínimo y máximo encontrados fueron 2,2 y $39,9 \text{ kg mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$, pero cuando se toman como extremos los percentiles 5 y 95 el rango queda determinado entre valores de EUA de 11 y $27 \text{ kg mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$. Existen diversos factores que podrían contribuir a la explicación de dichos valores, entre los que los autores destacan el clima, el manejo del riego y el manejo del suelo y mencionan al riego deficitario (RD) como una alternativa para obtener los mayores niveles de EUA.

Ceriani y Innella (2012) encontraron una EUA de $14,5 \text{ kg mm}^{-1}$ en un establecimiento comercial de la localidad de Dolores, Uruguay, donde con el riego y las precipitaciones se cubrió el 80% de la ETc.

Callero (2014), en Paysandú, Uruguay, en la temporada 2012 obtuvo un valor de EUA de 26 kg mm^{-1} evapotranspirado, siendo el resultado de lograr un rendimiento de 14000 kg ha^{-1} con una ETc de 542 mm.

Bergonci et al. (2001) obtienen la mayor EUAR de hasta $40 \text{ kg de grano ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ cuando el riego se aplicó en el periodo reproductivo, con niveles de riego alrededor de 80 - 85% de CC.

Otegui et al. (1995) encontraron valores de EUAR de $18 \text{ kg de grano ha}^{-1}$ y $4,7 \text{ granos m}^2$ por mm adicional consumido durante 40 días centrados en la floración. Los tratamientos con déficit consumieron 44% menos agua que el testigo regado y presentaron mayores valores de EUA. Sin embargo, Payero et al. (2009) determinaron que los mayores valores de EUA y EUAR se dieron cuando la relación E_{Tr}/E_{Tc} fue mayor. En Balcarce, sin limitantes hídricas y nutricionales, el maíz produjo $22,5 \text{ t ha}^{-1}$ de biomasa aérea presentando valores de EUA de 42 kg MS mm^{-1} de agua consumida (Andrade y Gardiol, 1995).

2.8.2. Riego deficitario

La estrategia de riego tradicional ha sido suministrar agua suficiente para que los cultivos transpiren a su máximo potencial y que los requisitos completos de ET se cumplan durante toda la temporada. Por diferentes motivos, esta tecnología de riego está siendo cuestionada en muchos países, entre los motivos más importantes se encuentran los grandes volúmenes de agua utilizados y la escasez de la misma en otros sectores. En estas situaciones se propone un cambio de paradigma, y que el objetivo del agricultor debe ser maximizar la utilidad neta por unidad de agua utilizada en lugar de por unidad

de tierra (Fererer y Soriano, 2007). En tal sentido Zwart y Bastiaanssen (2004) mencionan que los valores de EUA en sistemas de secano son bajos pero aumentan considerablemente cuando se aplican pequeñas cantidades de agua de riego, alcanzándose en maíz los valores óptimos de EUA con aproximadamente 280 mm de agua de riego en el ciclo.

Girona et al. (2014) afirman que el RD 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, limitando de manera controlada la disponibilidad hídrica en un período determinado de su ciclo.

Cada situación de RD debería ser definida en términos del nivel de agua a agregar en relación a la máxima ET del cultivo. Para cuantificar el nivel de RD es necesario primero definir los requerimientos de ET del cultivo con riego total (Fererer y Soriano, 2007). Además, Girona et al. (2014) mencionan que para diseñar una estrategia de RD se debe conocer el ciclo del cultivo y como diferentes niveles de estrés hídrico afectan el rendimiento.

La relación entre el rendimiento y el riego se ve afectada por factores tales como el clima, las propiedades del suelo y las prácticas de riego (Tolk y Howell, 2003). Estos factores deben tenerse en cuenta a la hora de proponer estrategias de RD. Stockle y James (1989) encontraron que la gran capacidad de retención de agua del suelo, alto contenido de agua del suelo a la siembra y sistemas de raíces profundas fueron factores importantes para la implementación exitosa de RD. Por estas razones, es importante estudiar la respuesta de los cultivos al déficit de agua bajo condiciones de cultivo locales.

En las condiciones del Uruguay, el RD es una estrategia de singular importancia para bajar los costos directos de la tecnología (Giménez, 2014a).

Fererer y Soriano (2007) indican que el rendimiento está fuertemente correlacionado con la ET y por lo tanto con el riego aplicado. Esto es así en cierto rango, dado que luego los rendimientos no son proporcionales a la ET o riego aplicado, es a partir de dicho punto que la EUA comienza a disminuir.

Los cultivos tienen diferente sensibilidad a la escasez de agua en las diferentes etapas de desarrollo, y el sistema de RD debe ser diseñado para manejar el estrés y minimizar la disminución de los rendimientos. Sin embargo, cuando la disminución del rendimiento, en términos relativos, es menor que la disminución de la ET, la EUA bajo RD aumenta en relación a la que tiene riego total. En este sentido Klocke et al. (2011) obtuvieron el 82% de rendimiento total con aplicaciones de riego del 60-70%. Además,

Ertek y Kara (2013) manteniendo el perfil con 85% de AD obtuvieron un rendimiento 10% menor en comparación con el tratamiento de riego completo aplicando un 30% menos de agua de riego, estos datos son consistentes con los reportados por Zang (2003).

Por otra parte, Giménez (2012b) generó deficiencias hídricas en donde dejaba agotar el agua en el perfil hasta 20% AD y luego se reponía hasta 60 y 40% AD en PC y etapas no críticas de determinación del rendimiento respectivamente. Durante las etapas sin deficiencias el agua del perfil se reponía cuando se agotaba el 40 y 60% AD en etapas críticas y no críticas respectivamente, llegando a 90% AD. Las deficiencias fueron generadas durante el PC, el llenado de grano y durante la etapa vegetativa y continuando durante el PC, los resultados obtenidos fueron 52%, 70% y 44% respectivamente como rendimiento relativo al tratamiento sin deficiencias.

Kang et al. (2000) realizaron experimentos implementando RD en una región semiárida de China. Estos autores diferenciaron el manejo del riego en dos etapas, vegetativo (V) (23 – 43 días pos siembra (DPS) y etapa de elongación del tallo (E tallo) (46 – 80 DPS), en las que se realizaron tratamientos que diferían en el porcentaje de AD, levantándose siempre las deficiencias luego de dichos períodos. No se encontraron diferencias significativas entre el tratamiento totalmente regado, 60 – 80% AD (V) y 65 – 85% AD (E tallo); regado medio, 50 – 60% AD (V) y 55 – 65% AD (E tallo); y menos regado, 40 – 50% AD (V) y 55 – 65% AD (E tallo) los cuales presentaron los rendimientos máximos.

Jonghan y Giovanni (2009) enfocan el RD desde la ETc, y reportan que la gestión del riego del maíz en un 75% de la ETc es factible con reducción del 10% del rendimiento de grano. Y en los resultados demuestran que el riego basado en la ETc puede ser uno de los esquemas de distribución más eficiente del agua.

Ertek y Kara (2013) evaluaron el efecto de cinco tasas diferentes de deficiencia hídrica sobre el rendimiento del maíz y sus componentes durante dos años. Las tasas utilizadas fueron 1,00 (sin deficiencia); 0,85; 0,70; 0,55 y 0,40. Los resultados indican que los mayores rendimientos se obtuvieron en el tratamiento sin deficiencia y con deficiencia de 15%, de lo contrario, los mínimos se encontraron para los dos tratamientos de mayor deficiencia. Sin embargo, obtuvieron para el tratamiento de 30% de deficiencia la mayor EUA y logró un 96% del rendimiento del tratamiento con riego completo recibiendo el 78% de agua de riego que dicho tratamiento.

Ko y Piccinni (2009) en un estudio realizado en Texas, EEUU evaluaron el efecto de tres niveles de riego donde los tratamientos fueron riego completo (donde se cubrió toda la ETc), riego medio (75% del riego completo) y riego mínimo (50% del

riego completo) y encontraron que el tratamiento de riego mínimo rindió consistentemente menos que los de riego completo y riego medio, alcanzando con este tratamiento rendimientos entre 78-88% del tratamiento sin deficiencias. Sin embargo, ellos afirman que es posible regar al 75% del riego completo con una merma del 10% del rendimiento logrando mayores EUA. Ellos sostienen que la EUA disminuyó linealmente a medida que aumentó el agua que recibió el cultivo siendo la mayor EUA encontrada $16 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

El ensayo se realizó en el campo experimental de riego de la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni” de la Facultad de Agronomía, ubicada sobre la ruta 3, km 363, en el Departamento de Paysandú, Uruguay (32°22´ S 58°03´ O), durante el año agrícola 2013-14. El campo experimental posee un suelo clasificado como 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. Las características hidrológicas principales del suelo se presentan en el cuadro 1.

Cuadro No. 1. Características hidrológicas del suelo.

Horizontes	Profundidad (cm)	Dap (gr/cm ³)	CC (mm)	PMP (mm)	CAAD (mm)
A	0 – 20	1,25	54	28	26
B	20 – 70	1,34	235	150	85
AB	0 – 70		289	178	111

Dap: densidad aparente, CC: capacidad de campo, PMP: punto de marchitez permanente, CAAD: capacidad de almacenaje de AD.

3.1.1. Manejo experimental

El ensayo se sembró el 30 de octubre del 2013. El híbrido utilizado fue DK 670 de ciclo medio, la unidad experimental consistió en parcelas de 5 hileras de 5 m de longitud y una distancia entre hileras de 0,7 m.

El control químico de malezas se realizó con la aplicación en pre emergencia de la mezcla de herbicidas Atrazina (1 l ha⁻¹) y Dual Gold (2 l ha⁻¹).

De acuerdo a los análisis de suelo, no fue necesario fertilizar con fósforo y potasio. En el estadio V8 (Ritchie y Hanway, 1982) se aplicaron 150 kg ha^{-1} de N y se realizó una refertilización a V10 con 150 kg ha^{-1} de N, en ambas fertilizaciones la fuente nitrogenada utilizada fue urea.

En relación al control de plagas se presentó un ataque de *Spodoptera* sp. que fue controlado con una aplicación de insecticida Clorpirifos a razón de 1 l ha^{-1} , el estadio del maíz en que se desarrolló el control fue V4 y la fecha de la aplicación el 3 de diciembre.

3.1.2. Tratamientos

T1: bienestar hídrico en todo el ciclo (60% AD o más durante el PC y 40% de AD o más durante ENC).

T2: bienestar hídrico en PC y deficiencias hídricas en ENC (60% AD o más durante el PC y menor a 40% de AD en las ENC).

T3: bienestar hídrico en PC y llenado de grano, y deficiencias hídricas en etapa vegetativa (60% AD o más durante el PC, 40% o más en llenado de grano y menor a 40% AD en etapa vegetativa).

T4: riego deficitario controlado (50% de lámina neta de riego del T1).

T5: secano.

En el presente trabajo se consideró por deficiencias hídricas valores de AD menores a 40% en las ENC y menores a 60% de AD en el PC y mayores a 20% AD en ambas etapas, como también se entiende por bienestar hídrico, el contenido hídrico del suelo por encima de estos umbrales.

Para los momentos en que las parcelas debían estar en bienestar hídrico se mantenían con riego para evitar que el nivel de AD bajara del umbral predefinido, mientras que cuando se debía inducir déficits hídricos, no se regaba y a su vez se interceptaban las PP mediante simuladores de sequía. Los simuladores consisten en una estructura de hierro de $3,5\text{m} \times 5\text{m} \times 2,5$ de altura, diseñadas con techo a dos aguas y cuatro paredes, las que se cubrían con una lona impermeable para evitar que las precipitaciones ingresen a la unidad experimental. Estos simuladores de sequía son móviles y por lo tanto se colocaban sobre las parcelas sólo durante los eventos de precipitaciones. Además, con el objetivo de evitar el ingreso de agua de escurrimiento a la parcela se construyó una ronda de 0,2 m. de altura alrededor de cada una de las

parcelas en las que se debía impedir el ingreso de agua de lluvia. También fueron contruidos desagües para evacuar los excesos de agua. Para definir la colocación de los simuladores de sequía se utilizaron pronósticos meteorológicos de corto plazo.

El método de riego utilizado fue por goteo con cintas con goteros cada 0,2 m y con un caudal/gotero de 1,49 lt h⁻¹.

Para definir la lámina de riego a aplicar diariamente se realizó un balance hídrico (BH) de suelos simplificado de acuerdo a la siguiente fórmula:

$BH = R + PP - ET_c$ siendo R los mm de riego agregados con un 90% de eficiencia, PP las precipitaciones, y la $ET_c = ET_o \times K_c \times K_s$, los K_c fueron los coeficientes de cultivo para maíz propuestos por FAO (Allen et al., 1998) y $K_s = ADT - Agotamiento\ de\ humedad\ del\ suelo\ (mm) / ADT - AFA$, donde ADT es el agua disponible total en el suelo en mm, mientras que $AFA = ADT - p$ medido en mm.

3.2. DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO

3.2.1. Hipótesis biológicas

Disponibilidades hídricas iguales o superiores a 60% de AD durante el PC de determinación de rendimiento, y superiores o iguales a 40% de AD en las ENC, permiten obtener rendimientos potenciales para el ambiente de producción en el que se desarrolla el cultivo.

3.2.2. Hipótesis estadísticas

H_0 : las medias de los tratamientos son iguales: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$ o los efectos de los tratamientos son iguales: $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5$

H_a : existe al menos una diferencia entre las medias de los tratamientos o existe al menos un efecto de los tratamientos diferente.

3.2.3. Diseño experimental

Se utilizó un DBCA (Diseño en Bloques Completos al Azar), con tres bloques y cinco tratamientos.

3.3. DETERMINACIONES REALIZADAS

Durante el ciclo del cultivo se realizaron dos muestreos de materia seca correspondiendo al principio y al final del PC, es decir 15 días antes a 15 días después del inicio de la floración femenina. Para ello se cortó 1 m lineal de plantas por parcela al ras del suelo correspondiente a una fila contigua de una de las de los bordes. Dichas muestras fueron secadas en estufa hasta que alcanzaron un peso constante y a partir de estas determinaciones se calculó la TCC durante el PC.

Se elaboraron los balances hídricos en los que se estimaron las pérdidas y ganancias de agua del suelo y se estudió la evolución del AD en cada tratamiento corroborando que los niveles de agua del suelo se mantuvieron dentro de los rangos planeados.

Una vez alcanzada la madurez fisiológica, se cosecharon 3 m lineales de la hilera del medio donde se midió el peso verde, número de espigas por planta, número de granos por espiga, peso de los mil granos y peso total a partir del cual se estimó el rendimiento.

A su vez, se extrajo una planta representativa de cada parcela para medir peso seco y calcular la materia seca producida por ha.

3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos fueron analizados con el software estadístico “INFOSTAT” versión estudiantil 2013, realizándose:

Análisis de la varianza: en el que se descompone la variación en tantos componentes como tenga el modelo.

Pruebas de comparación múltiple: Tukey al 5% de significancia.

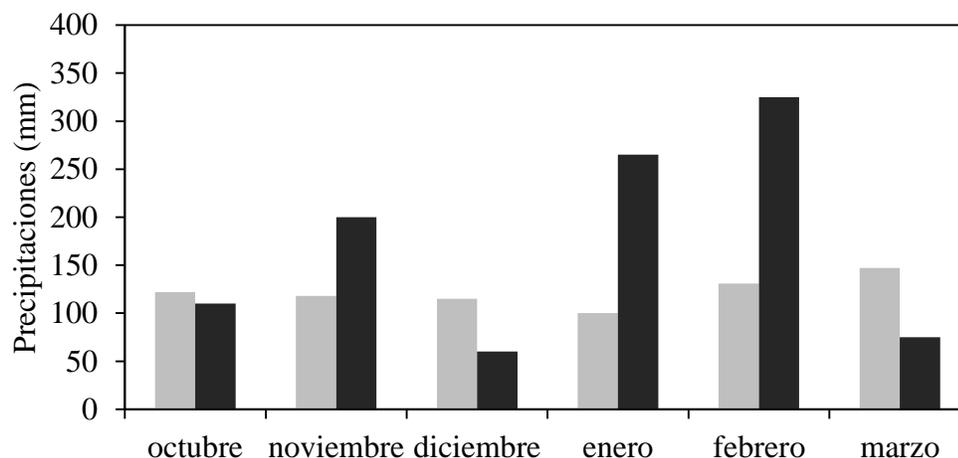
Análisis de correlación: se analizaron las variables de interés, de forma de obtener una medida de la magnitud de asociación entre las variables, mediante el coeficiente de Pearson.

3.5. CONDICIONES CLIMÁTICAS EN EL PERÍODO DEL CULTIVO

3.5.1. Precipitaciones

En la figura 1 se presentan las precipitaciones mensuales registradas en la estación meteorológica automática de la EEMAC para el periodo de cultivo 2013-14 y los valores promedio históricos de la serie 1961-2009, elaboradas por la MDN. DNM (2011), para la ciudad de Paysandú.

Al observar las precipitaciones mensuales se ve una gran variación con respecto a la media histórica, siendo éstas superiores en noviembre, enero y febrero e inferiores octubre, diciembre y marzo. También las precipitaciones en todo el ciclo del cultivo fueron superiores a la media, 1035 mm y 733 mm respectivamente.



Columnas negras: precipitaciones de la temporada 2013-14, columnas grises: precipitaciones promedio de la serie histórica 1961-2009.

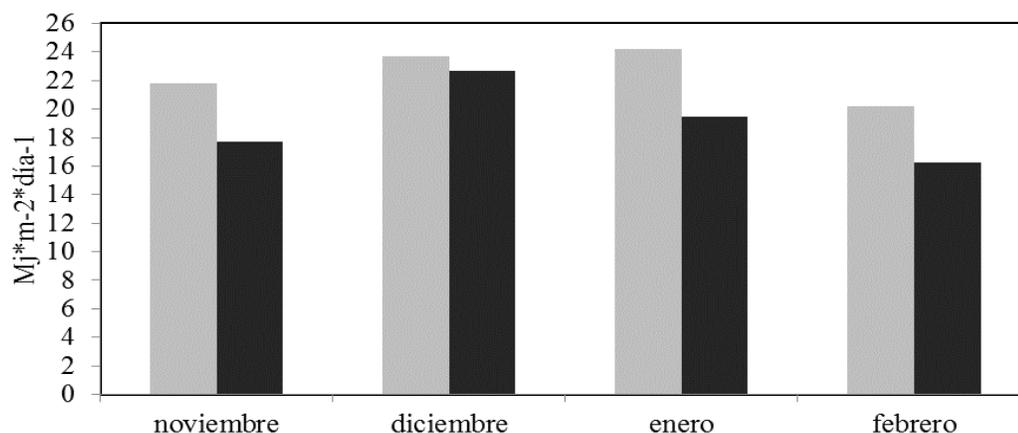
Figura No. 1. Precipitaciones (mm) ocurridas durante 2013-14 valores promedio de la serie histórica 1961 a 2009.

Fuente: elaborado en base a datos proporcionados por Facultad de Agronomía. EEMAC y la MDN. DNM.

3.5.2. Radiación solar

En la figura 2 se muestran los valores mensuales promedio de la RS incidente para el período diciembre-febrero de la temporada 2013-14 y el promedio de la década 2002-12. La RS incidente en el año del experimento fue menor en todos los meses que el promedio para la década de referencia. Además, se puede observar que en los meses en los que las precipitaciones fueron superiores al promedio, la RS incidente de la temporada 2013 fue claramente menor al promedio como consecuencia de la mayor cantidad de días nublados ocurridos en esos meses.

Es importante destacar que en el mes de enero transcurrió mayoritariamente el PC de determinación del rendimiento del cultivo, coincidiendo con uno de los meses en que la RS se vio disminuida alrededor de un 20% respecto a la década de referencia, lo que posiblemente esté afectando en cierta medida el rendimiento obtenido en el tratamiento de riego completo.



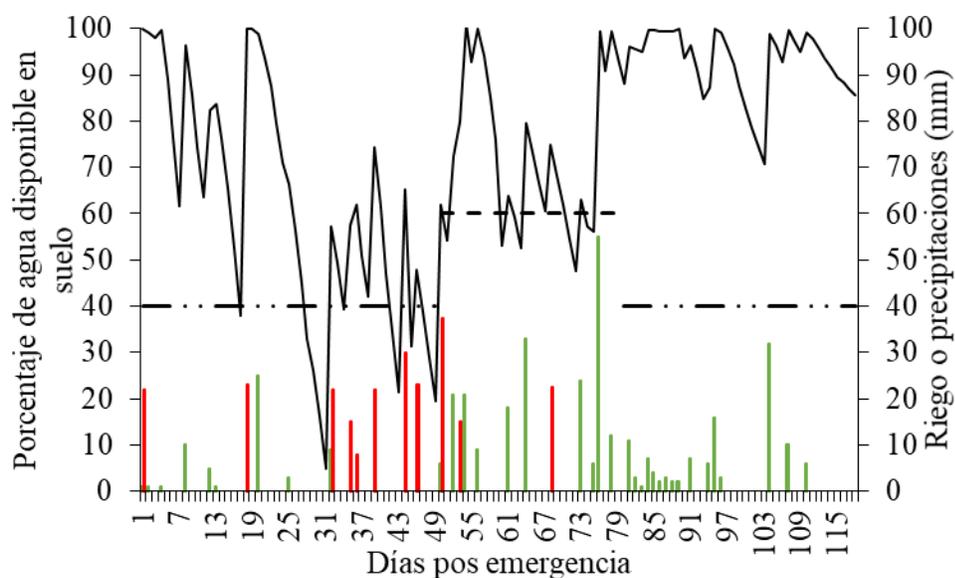
Columnas grises: promedio mensual período 2002 – 12, columnas negras: zafra 2013 – 14.

Figura No. 2. Radiación solar incidente promedio mensual ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) para el período 2002 – 12 y para la zafra 2013–14.

3.5.3. Aportes hídricos y evolución del contenido de agua del suelo

A continuación, se presentan los balances hídricos de suelos simplificados y estimados para cada tratamiento evaluado.

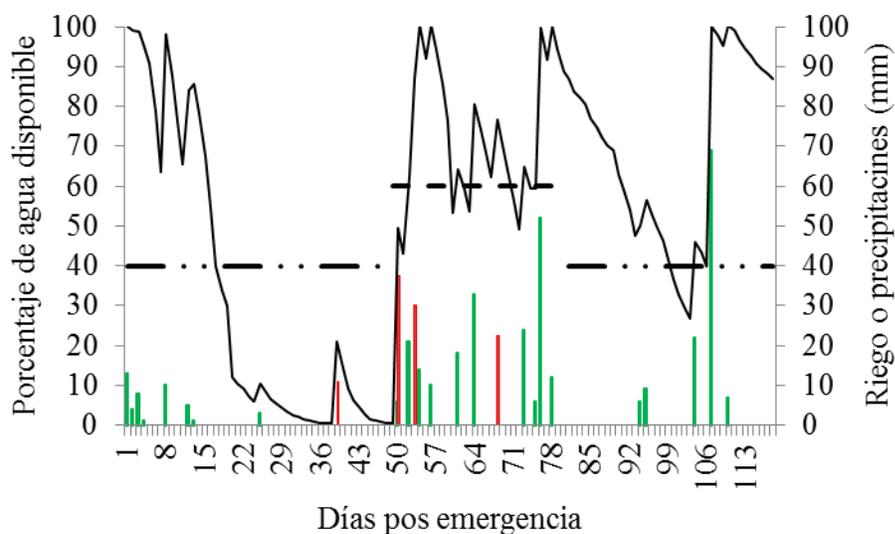
En la figura 3 se presenta el balance hídrico de suelos para el tratamiento con bienestar hídrico (T1) donde se observa que durante la fase vegetativa el porcentaje de AD del suelo estuvo por encima del umbral determinado (40% AD), teniendo sólo breves períodos por debajo de dicho umbral. El porcentaje de AD del suelo durante el PC alcanzó la CC y luego disminuyó manteniéndose en torno al 60% AD. A partir de este momento (71 días posemergencia) el contenido de agua aumenta volviendo a estar en situación de bienestar hídrico a partir de fines del PC y todo el período de llenado de granos.



Línea negra: agua disponible en el suelo (%), línea verde: precipitaciones (mm), línea roja: riego (mm). El umbral de riego para las etapas no críticas (---) de 40% de agua disponible y para el período crítico (---) de 60% de agua disponible.

Figura No. 3. Evolución del agua disponible en el suelo, precipitaciones y riego para el tratamiento con bienestar hídrico (T1).

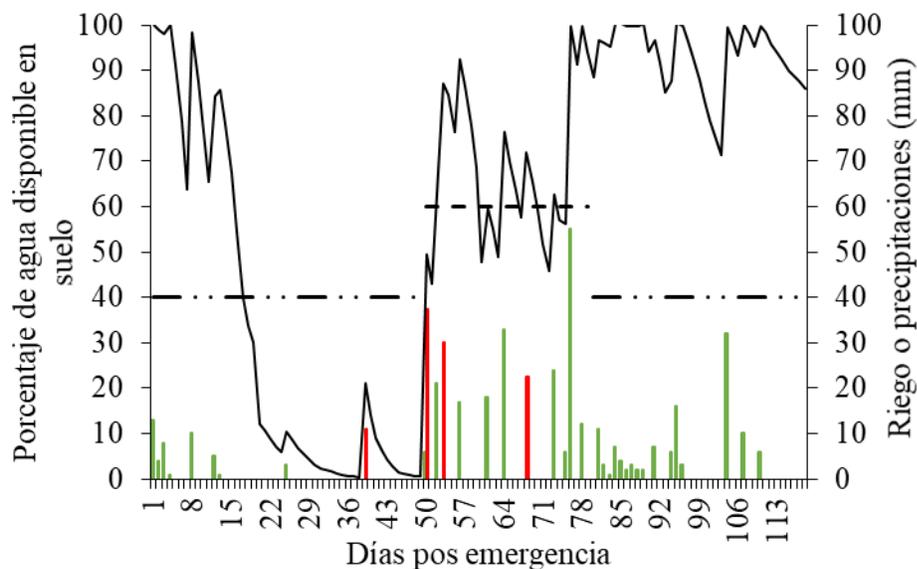
En la figura 4 se muestra el balance hídrico del tratamiento con bienestar hídrico en el PC (T2). El mismo presentó un marcado déficit durante gran parte de la etapa vegetativa, el contenido de AD del suelo se situó muy por debajo del umbral de riego en gran parte de dicha etapa. Este déficit se prolonga hasta la entrada del PC donde se llevó el perfil a CC y se mantuvo por encima del 60% de AD, es decir sin deficiencias hídricas. Durante la etapa de llenado de granos el cultivo presentó un leve déficit hídrico a mediados de dicha etapa y luego alcanzó el nivel de CC y se mantuvo en buenas condiciones de humedad del suelo hasta la madurez fisiológica.



Línea negra: agua disponible en el suelo (%), línea verde: precipitaciones (mm), línea roja: riego (mm). El umbral de riego para las etapas no críticas (.....) de 40% de agua disponible y para el período crítico (---) de 60% de agua disponible.

Figura No. 4. Evolución del agua disponible en el suelo, precipitaciones y riego para el tratamiento con bienestar hídrico en PC (T2).

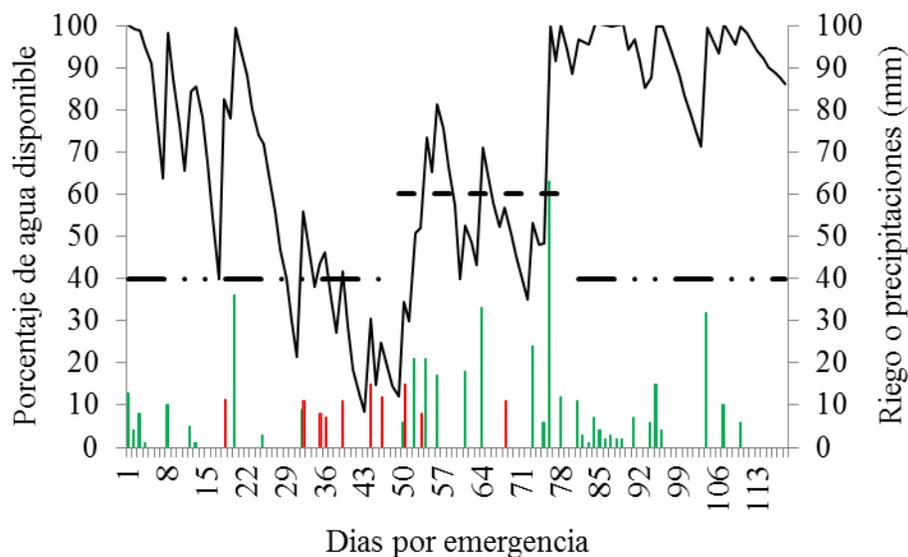
En la figura 5 se muestra el balance hídrico para el tratamiento con bienestar hídrico durante PC y llenado de grano (T3) en el cual, al igual que el T2 mostró un prolongado e intenso déficit hídrico durante gran parte de la etapa vegetativa el cual fue levantado al comienzo del PC y se mantuvo con bienestar hídrico hasta la madurez fisiológica.



Línea negra: agua disponible en el suelo (%), línea verde: precipitaciones (mm), línea roja: riego (mm). El umbral de riego para las etapas no críticas (.....) de 40% de agua disponible y para el período crítico (---) de 60% de agua disponible.

Figura No. 5. Evolución del agua disponible en el suelo, precipitaciones y riego para el tratamiento con bienestar hídrico en PC y llenado de grano (T3).

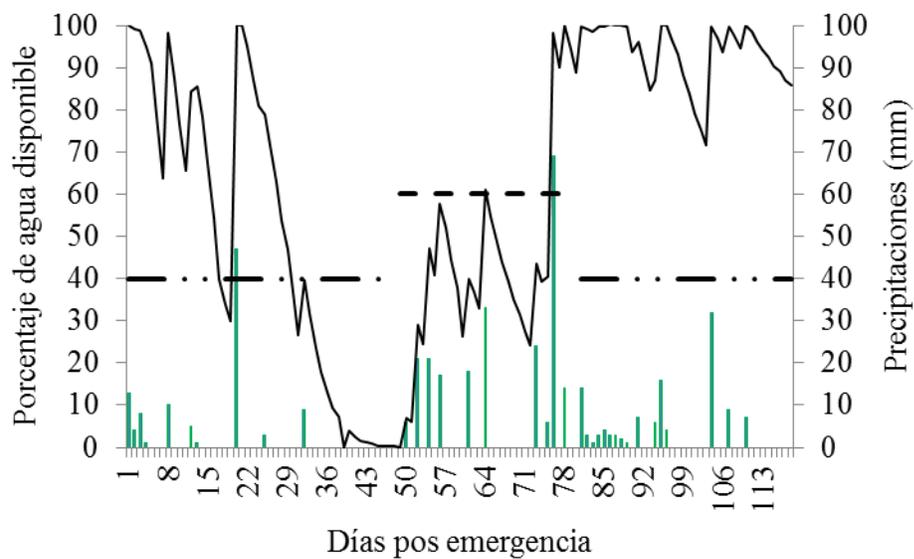
En la figura 6 se presenta el balance hídrico que corresponde al tratamiento de RD, se observa que el AD descendió por debajo del umbral de riego a fines de la etapa vegetativa (40% AD en ENC) para levantar a principios del PC y se mantuvo en el entorno del umbral durante esta etapa (60% AD), luego se mantuvo en bienestar hídrico hasta la madurez fisiológica.



Línea negra: agua disponible en el suelo (%), línea verde: precipitaciones (mm), línea roja: riego (mm). El umbral de riego para las etapas no críticas (- - -) de 40% de agua disponible y para el período crítico (---) de 60% de agua disponible.

Figura No. 6. Evolución del agua disponible en el suelo, precipitaciones y riego para el tratamiento con riego deficitario (T4).

En la figura 7 se muestra el balance hídrico para el tratamiento en secano (T5) en el cual el comportamiento del agua en el suelo dependió únicamente de las precipitaciones ocurridas durante el cultivo y de la ET_c aj. Se observó un descenso constante de la humedad del suelo a partir del día 21 pos-emergencia alcanzando niveles muy por debajo del umbral de riego y se mantuvo con déficit durante aproximadamente 40 días, período dentro del cual transcurre gran parte del PC. Luego aumentó el contenido de agua del suelo debido a las abundantes precipitaciones ocurridas durante los meses de enero, febrero y marzo manteniéndose el cultivo en buenas condiciones hídricas durante la etapa de llenado de grano.



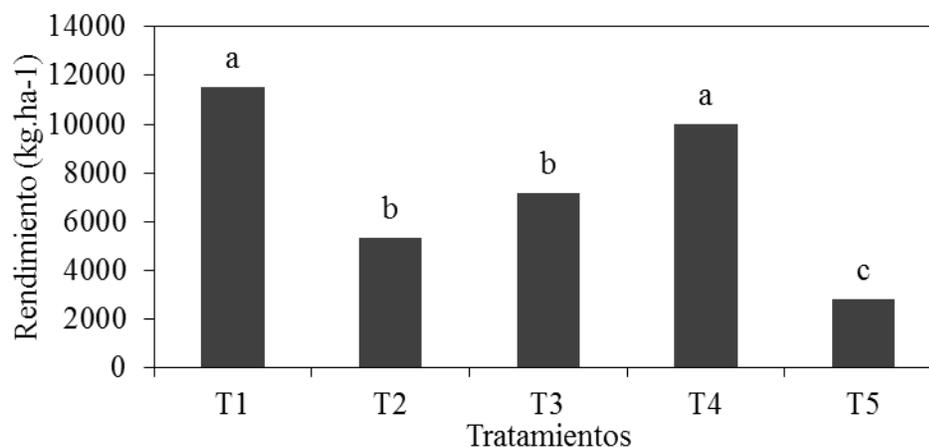
Línea negra: agua disponible en el suelo (%), línea verde: precipitaciones (mm). El umbral de riego para las etapas no críticas (----) de 40% de agua disponible y para el período crítico (-·-) de 60% de agua disponible.

Figura No. 7. Evolución del agua disponible en el suelo, precipitaciones para el tratamiento en secano (T5).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. EFECTO DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA SOBRE EL RENDIMIENTO

En el presente capítulo se presentan los resultados del experimento donde se evaluó en qué medida fueron afectadas las principales variables que determinan el rendimiento de maíz, a causa de diferentes estrategias de manejo del agua de riego. En la figura 8 se muestran los rendimientos obtenidos en los distintos tratamientos, los mismos evidencian que fueron significativamente afectados por las estrategias de riego.



Las columnas con letras iguales no difieren entre sí ($P < 0.05$; Tukey).

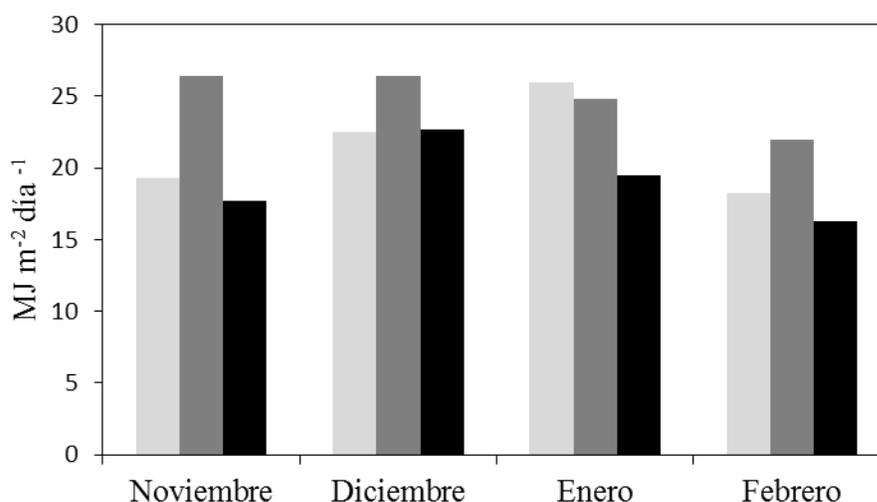
Figura No. 8. Rendimiento en grano (kg ha^{-1}) en los diferentes tratamientos evaluados.

El primer resultado a destacar es el rendimiento bajo del T1 ($11.534 \text{ kg ha}^{-1}$) en comparación con los potenciales para la región de 13.200 y $15.300 \text{ kg ha}^{-1}$ obtenidos por Giménez (2012b) bajo similares condiciones edáficas y de manejo del cultivo. Los elementos que podrían haber generado menores rendimientos son la baja RS y algunos días donde el AD se ubicó por debajo del 60% durante el PC de acuerdo a la figura 3.

Con el objetivo de analizar el efecto de la RS incidente sobre el rendimiento del tratamiento con bienestar hídrico, se comparó el resultado obtenido en el presente trabajo con los expuestos por Giménez (2012b) en la misma localidad para los años

2009 y 2010. El rendimiento estuvo en gran medida determinado por la RS incidente ya que el mayor rendimiento alcanzado ($15.300 \text{ kg ha}^{-1}$) se logró cuando la RS incidente en el período noviembre-febrero fue mayor (2.990 MJ m^{-2} temporada 2010) y el menor rendimiento ($11.534 \text{ kg ha}^{-1}$) cuando la RS incidente en el mismo período fue menor (2.290 MJ m^{-2} , temporada 2013).

La menor RS incidente fue particularmente baja en el mes de enero (figura 9), en el cual transcurrió el PC, lo que podría haber acentuado las mermas en el rendimiento. Estos resultados coinciden con los expresados por Cárcova et al. (2003), quienes afirman que el rendimiento de un cultivo se encuentra determinado por factores no modificables del ambiente como la RS, las temperaturas y los suelos.



Columnas gris claro: temporada 209, columnas gris oscuro: temporada 2010, columnas negras: temporada 2013.

Figura No. 9. Radiación solar incidente promedio mensual ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) para el período noviembre – febrero da las temporadas 2009, 2010 y 2013.

Al analizar las diferentes estrategias de riego evaluadas se observa que, el T2 (bienestar hídrico en PC) y T3 (bienestar hídrico en PC y llenado de grano) obtuvieron rendimientos menores al T1 (bienestar hídrico) y T4 (riego 50% de T1).

En caso del T2, donde se aplicó el riego únicamente durante el PC se obtuvo un rendimiento de 5.339 kg ha^{-1} , producto de una intensa y prolongada deficiencia de la

etapa vegetativa, a lo que se le sumó una moderada deficiencia hídrica en el llenado de grano que se tradujo en menor peso de los mismos.

Dado que no se han encontrado investigaciones con tratamientos similares en la región, no se puede comparar el resultado. Pero resulta llamativamente bajo el rendimiento para un cultivo que estuvo en bienestar hídrico durante el PC.

La estrategia que priorizó el riego durante el PC y el llenado de grano logró un rendimiento de 7.154 kg ha^{-1} , el cual equivale a una merma en el rendimiento de 38% respecto al T1. Este resultado difiere con los 15 y 25% de disminución de rendimiento obtenidos por NeSmith y Ritchie (1992c) donde la deficiencia fue moderada y de menor duración ya que el cultivo fue expuesto durante 15 días antes del PC a niveles de AD entre 20 y 40%. La disminución en el rendimiento es importante a pesar haber tenido deficiencias hídricas en una etapa donde no se define el rendimiento. Al igual que en el T2, las deficiencias hídricas fueron intensas y prolongadas en la etapa vegetativa (figuras 4 y 5).

Los niveles bajos de AD durante los días previos al inicio del PC en el T2 y el T3, especulamos que podrían haber causado un efecto negativo sobre el desarrollo reproductivo, a pesar de haber sido restaurada la condición hídrica justo al inicio del PC. La deficiencia hídrica intensa a fines de la etapa vegetativa es posible que también haya limitado la absorción de nutrientes durante dicha etapa y pudo haber tenido influencia sobre el comportamiento fisiológico de la planta durante los días próximos a recomponerse la condición hídrica.

Es destacable el alto rendimiento del tratamiento de RD ($10.003 \text{ kg ha}^{-1}$) en relación al T1, cabe indicar que hubo un aporte significativo de agua por las precipitaciones que recibió el tratamiento de RD ya que a partir del mes de enero, inicios del PC, las precipitaciones alcanzaron los 625 mm y solo fue necesario regar 23 mm en el T1 y 11 mm en el T4, lo cual pensamos haya limitado la expresión de diferencias entre ambos tratamientos.

En estudios similares, Zang (2003), Klocke et al. (2011), Ertek y Kara (2013) utilizando entre 60 y 70% de agua de riego del tratamiento de riego completo obtuvieron reducciones de rendimiento entre 10 y 20% en relación al tratamiento sin deficiencias. Ko y Piccinni (2009) también observaron pérdidas de rendimiento al disminuir el agua de riego, en este caso alcanzaron rendimientos relativos al tratamiento con bienestar hídrico del 78-88% utilizando 50% de agua de riego de dicho tratamiento, difiriendo estos datos de los obtenidos en este trabajo donde no se generó disminución en el rendimiento por reducir el agua de riego.

Cuando se evalúan estrategias de riego deficitario se debe tener presente el comportamiento de las precipitaciones totales y efectivas, éstas son las que afectan el agua efectiva total dado que el riego está controlado. En el cuadro 2 se presenta en forma discriminada el aporte del agua efectiva. Se puede observar que el agua efectiva en el T4 fue únicamente 49 mm inferior al T1 a pesar de haber recibido 110 mm menos de riego. Esto evidencia que el T4 tuvo una mayor eficiencia de uso de las precipitaciones totales.

Cuadro No. 2. Evapotranspiración del cultivo (mm), precipitaciones totales (mm), precipitaciones efectivas (mm), riego total (mm), riego efectivo (mm) y agua efectiva (mm) para los diferentes tratamientos evaluados.

Tratamientos	ETc (mm)	PP total (mm)	PP efectiva (mm)	Riego total (mm)	Riego efectivo (mm)	Agua efectiva (mm)
T1	522	800	376	243	219	573
T2	358	503	354	113	102	446
T3	342	724	335	113	102	427
T4	440	800	426	121	109	524
T5	353	800	448	0	0	448

El T5 fue el tratamiento en secano, donde se obtuvo el menor rendimiento de grano de 2788 kg ha⁻¹ (figura 8). A pesar de haber recibido precipitaciones importantes (265 mm) durante el PC, con un 56% de agua efectiva del total de las precipitaciones ocurridas en el cultivo. La interpretación que realizamos de estos resultados es que el contenido hídrico del suelo era muy bajo cuando comenzaron las PP y no logró llegar al umbral de AD a partir del cual el cultivo no sufre deficiencias hídricas. Esto determina que el cultivo se encuentre bajo deficiencias hídricas prolongadas desde mediados de la etapa vegetativa hasta casi el comienzo del llenado de grano (figura 7), siendo en gran parte una deficiencia severa en etapas determinantes del rendimiento. En consecuencia, limitó el crecimiento vegetativo, generando menor IAF y una menor RS int. (Otegui, 1992), redujo la eficiencia de conversión de la RS int. en biomasa logrando una baja TCC, así como reducen la partición de asimilados a la espiga disminuyendo la producción final de granos (Andrade et al., 1996).

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

Como se observa a continuación en el cuadro 3, se presenta el efecto de cada tratamiento sobre los componentes numéricos del rendimiento en grano. El T1 fue el tratamiento que logró mayor NG por m², siendo inferior a los 4580 y 5500 granos m⁻² logrados por Giménez (2012b) donde obtuvo rendimientos de 13.200 y 15.300 kg. respectivamente.

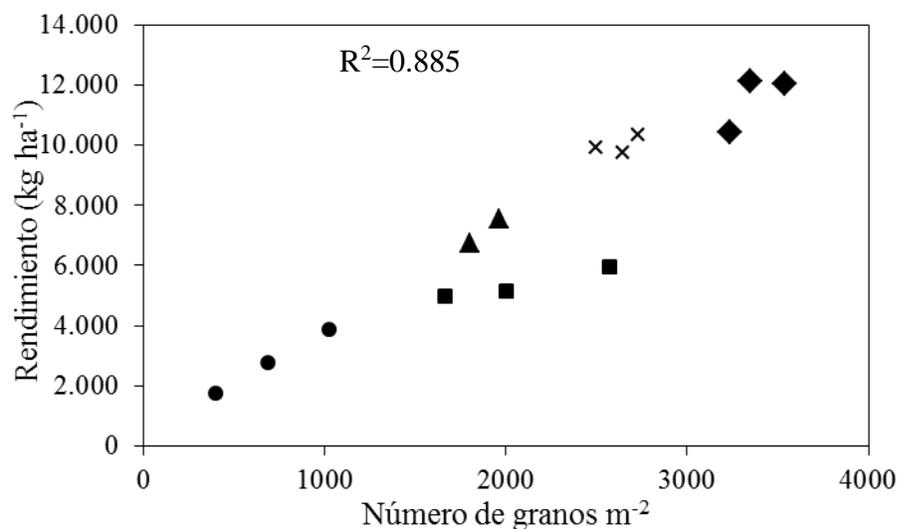
Cuadro No. 3. Número de granos por m², número de granos por espiga, número de espigas por planta y peso de 1000 granos, para los tratamientos evaluados: bienestar hídrico (T1), bienestar hídrico en período crítico (T2), bienestar hídrico en período crítico y llenado de grano (T3), riego deficitario (T4) y secano (T5).

Tratamientos	No. de granos m ²	No. de granos espiga	No. de espigas planta	Peso de 1000 granos
T1	3377 a (a)	367	1,38	373 a
T2	2084 b (bc)	253	1,24	271 b
T3	1881 b (c)	216	1,36	424 a
T4	2623 ab (b)	300	1,31	416 a
T5	706 c (d)	130	0,79	435 a

(*) Letras iguales en la misma columna no difieren entre sí (P<0.05; Tukey). Letras entre paréntesis iguales en la misma columna no difieren estadísticamente entre sí. (P<0.1; Tukey).

El T1 no presentó diferencias estadísticas en NG m⁻² con el T4, pero si con el resto de los tratamientos. No obstante, hay una diferencia de más de 750 granos m⁻² entre los mismos. El T4 presentó una tendencia a lograr menor NG m⁻² sin disminuciones en el peso de los granos, esto podría estar explicando la diferencia de rendimiento mencionada anteriormente entre el T1 y el T4.

En la figura 10 se muestra la relación entre el rendimiento y el NG m⁻², y en la figura 11 la relación entre rendimiento y peso de mil granos.



Tratamiento 1 (◆), Tratamiento 2 (■), Tratamiento 3 (▲), Tratamiento 4 (×), Tratamiento 5 (●).

Figura No. 10. Relación entre el rendimiento en grano (kg ha⁻¹) y el número de granos (granos m⁻²) discriminados según los tratamientos evaluados.

En primer lugar, se puede ver en la figura 10 la existencia de una fuerte correlación ($R^2=0.885$) entre el NG m⁻² y el rendimiento, mientras que en la figura 11 se observa la baja relación que tiene el peso de los granos con el rendimiento lo que coincide con lo expresado por NeSmith y Ritchie (1992b), Otegui et al. (1995), Cárcova et al. (2003) quienes afirman que el rendimiento está más asociado al NG por superficie que al peso de los mismos. Por lo tanto, el componente que define en mayor medida el rendimiento es el NG por superficie, el cual es determinado en gran parte por las condiciones ambientales en prefloración (Otegui y Bonhomme, 1998).

En los T2 y T3 se ve como el déficit hídrico en la etapa vegetativa (figuras 4 y 5) tiene un efecto indirecto sobre el NG, debido a que el cultivo llega al PC con menor crecimiento vegetativo. Esto provoca que el cultivo muestre una tendencia a disminuir la TCC en el PC (figura 12) a pesar de no sufrir déficit hídrico en dicha etapa, alcanzando estos tratamientos un NG de 62% y 56% respectivamente con respecto al T1. Andrade et al. (1996) coinciden en que un menor crecimiento vegetativo debido al déficit hídrico en la etapa vegetativa provoca una menor intercepción de la radiación fotosintéticamente activa por el cultivo durante el PC afectando de esa manera la TCC en dicho período. A su vez Otegui y Bonhomme (1998) determinaron que el ambiente en prefloración define el número potencial de granos así como también la fertilidad de la segunda espiga.

En el cuadro 3 se observa que la fertilidad de la segunda espiga prácticamente no fue afectada por los distintos manejos en los diferentes tratamientos regados. Sin embargo, en el T5 si fue fuertemente afectada la fertilidad de la segunda espiga y también el NG fijados por espiga, esto se debió al déficit hídrico durante el PC. Al no ser analizado entre pre y posfloración (es decir los 15 días anteriores a la floración y los 15 días posteriores) el efecto no se puede adjudicar a una etapa en particular. Este efecto puede estar agravado por una población elevada para la disponibilidad hídrica que presentó el tratamiento en secano. Como también perjudicó la absorción de nutrientes por el intenso déficit hídrico sufrido.

El subcomponente que más afectó el NG m⁻², fue el NG por espiga mientras que el número de espigas por planta tuvo pequeñas variaciones (cuadro 3). En relación a este tema Andrade et al. (1996) indican que probablemente el menor NG por espiga en los tratamientos con déficit hídrico en la etapa vegetativa se debe a una menor fijación de granos en la segunda espiga lo que determina que en promedio tengan un menor NG promedio por espiga.

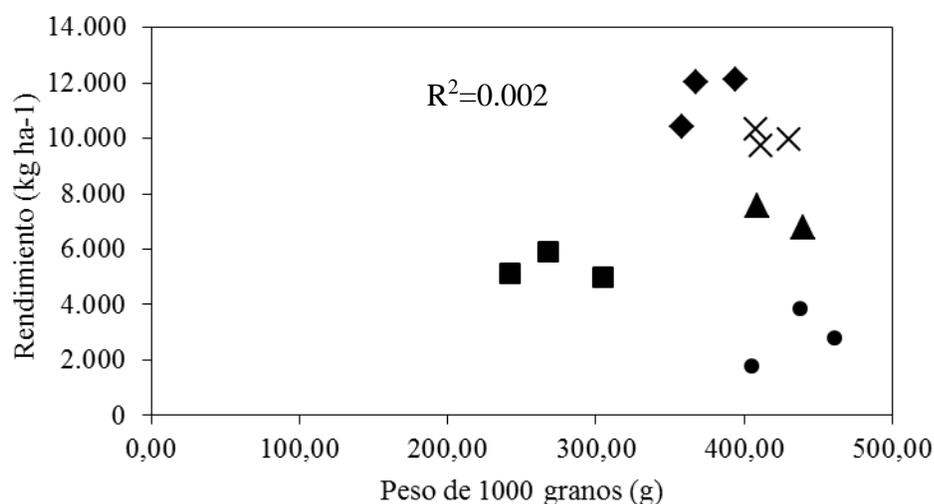
El T4 alcanzó un 78% del NG por superficie del T1, sin presentar diferencias con ninguno de los tratamientos regados. No obstante, el T4 presentó una tendencia a tener menor NG que el T1 y mayor que el T3, sin diferenciarse del T2. Estos resultados se deben a un déficit hídrico moderado al cual fue expuesto este tratamiento desde mediados de la etapa vegetativa hasta el fin del PC (figura 6) el cual afectó levemente al NG potencial en prefloración, concordando con los resultados de Otegui y Bonhomme (1998). Además, el leve déficit experimentado en el PC puede haber afectado en cierta medida la fijación de granos, a pesar de no experimentar una merma importante en el NG.

El T5 es el tratamiento que presentó el menor NG (cuadro 3) siendo estos el 21% del T1. Este bajo NG es debido al prolongado e intenso déficit hídrico sufrido desde mediados de la etapa vegetativa hasta fines del PC (figura 7) lo cual limitó el crecimiento y la expansión foliar. Interpretamos que este tratamiento pudo haber llegado al PC con menor IAF, limitando la interceptación de la radiación y provocando una baja TCC (200 kg MS ha⁻¹) durante el PC limitando la fijación de granos. Andrade et al. (1999) mencionan que alcanzar determinados valores de TCC en el PC es fundamental para lograr un flujo adecuado de asimilados a la espiga, y explica que con TCP de alrededor de 2 g d⁻¹ o menores la partición de MS a la espiga disminuye debido a que es una fosa débil en la planta en floración, debido a su ubicación axilar sujeta a dominancia apical.

Como se puede ver en el cuadro 3, la respuesta del peso de los granos a los diferentes tratamientos fue menor. Como se ha mencionado anteriormente este

componente se define durante la etapa de llenado de granos. NeSmith y Ritchie (1992b) concluyen que el efecto del estrés hídrico sobre el rendimiento en esta etapa depende de cuan temprano ocurra el mismo.

Entre los tratamientos evaluados no hay diferencias estadísticas significativas excepto en el T2, el cual presentó menor peso de granos que los otros tratamientos, siendo éste el único con deficiencia hídrica en el llenado de grano. Entre los tratamientos que tuvieron bienestar hídrico en la etapa de llenado si bien no se observan diferencias significativas se ve como el peso de los granos disminuye en pequeña medida a medida que aumenta el NG, este efecto negativo que tiene el NG sobre el peso se debe a que existe una relación negativa entre el NGP y el peso medio de los mismos a madurez fisiológica cuando se analiza un amplio rango de NGP (Cárcova et al., 2003).



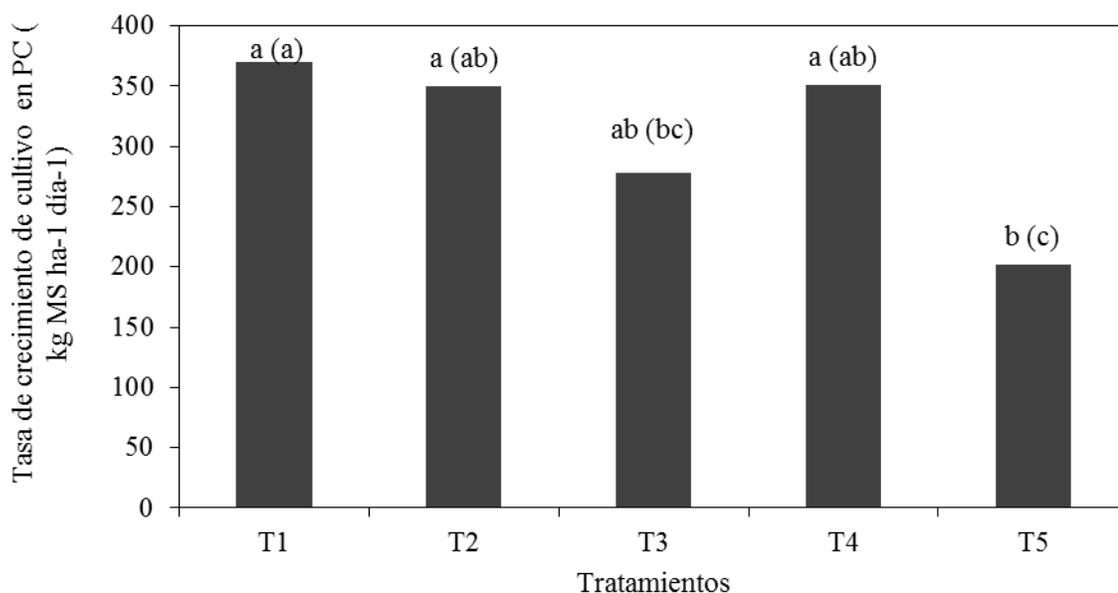
Tratamiento 1 (◆), Tratamiento 2 (■), Tratamiento 3 (▲), Tratamiento 4 (×), Tratamiento 5 (●).

Figura No. 11. Relación entre el rendimiento en grano (kg ha^{-1}) y el peso de los 1000 granos ($\text{g } 1000 \text{ granos}^{-1}$) para los tratamientos evaluados.

4.1.2. Tasa de crecimiento de cultivo durante el PC de determinación del rendimiento

En la figura 12 se muestra la TCC durante el PC, donde se observa que el T1 presentó $370 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$, con diferencia a los $480 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ por Carter y Petrella (2013) y los $590 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ reportado por Callero (2014). Andrade et al. (1996)

concluyeron que en este período es un buen indicador del estado fisiológico del cultivo. Claramente se ve en la figura 12 que no hay diferencias entre los T1, T2, T3 y T4, sin embargo, el secano (T5) es significativamente inferior, logrando valores levemente superiores a la mitad del T1 (54%). En el caso del T3 alcanzó una TCC del 75% en relación al T1.



Las columnas con letras iguales no difieren estadísticamente entre sí. Letras sin paréntesis $P < 0.05$; Tukey. Letras entre paréntesis $P < 0.1$; Tukey.

Figura No. 12. Tasa de crecimiento de cultivo (TCC) durante el período crítico (PC) (kg MS ha⁻¹ d⁻¹) en función de los tratamientos evaluados.

A pesar de no haber diferencia en la TCC entre el T3 (278 kg MS ha⁻¹ d⁻¹) y los T1 (370 kg MS ha⁻¹ d⁻¹) y T4 (350 kg MS ha⁻¹ d⁻¹) se puede observar una tendencia ($P < 0.1$; Tukey) a una menor TCC del T3 debido a una acumulación de MS inferior a inicio del PC producto de la deficiencia hídrica ocurrida durante la etapa vegetativa, disminuyendo la intercepción por parte del cultivo de la radiación fotosintéticamente activa durante el PC (Andrade et al., 1996). Este comportamiento coincide con el expresado por Otegui (1992) quien afirma que deficiencias hídricas durante la etapa vegetativa de maíz disminuyen el IAF y como consecuencia se reduce la superficie transpiratoria y la eficiencia de intercepción de la radiación y por consiguiente el rendimiento.

En el T5 a pesar de llegar al PC con mayor deposición de MS y por ende mayor IAF no logró expresar esta mejor condición en comparación con los T2 y T3 en la TCC durante el PC, debido al estrés hídrico sufrido en ese momento lo que evidencia la importancia del bienestar hídrico en el PC para lograr buenas TCC para que el cultivo sea capaz de generar y concretar buenos rendimientos.

4.2. EVAPOTRANSPIRACIÓN Y EFICIENCIA DE USO DEL AGUA

4.2.1. Evapotranspiración

En la figura 13, se muestra la evolución de la ETc estimada en el ciclo de desarrollo del cultivo en el T1.

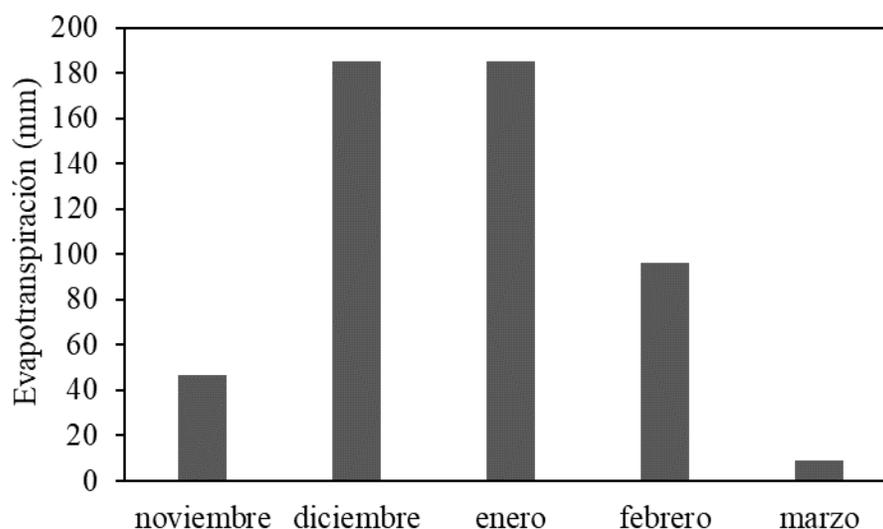


Figura No. 13. Evolución de la evapotranspiración del cultivo (ETc) mensual.

La ETc estimada durante el ciclo del cultivo fue de 522 mm para el T1, siendo levemente menor a la lograda por Callero (2014), en la temporada 2012, donde obtuvo una ETc de 542mm. Además, Giménez (2012a) determinó que para años climáticamente

contrastantes las ETc fueron de 600 mm para año “Niña” y 460 mm para un año “Niño”. Este año, catalogado como neutro, la ETc alcanzó un valor medio a dichos años contrastantes.

La mayor ETc se dió durante los meses de diciembre y enero donde se produce el 35% de la ETc total en cada mes, y a partir de febrero desciende para ser prácticamente nula en marzo, donde el cultivo alcanzó la madurez fisiológica en los primeros días del mes. Se destaca la elevada ETc durante la etapa vegetativa y la baja ETc en el período de llenado de grano en comparación con los resultados obtenidos por Callero (2014) que obtuvo valores de ETc de 3,2 mm día⁻¹ y 4,8 mm día⁻¹ mientras que en este ensayo obtuvimos valores de ETc de 4,6 mm día⁻¹ y 2,9 mm día⁻¹ en etapa vegetativa y llenado de grano respectivamente.

Como ya se mencionó anteriormente, el PC del cultivo transcurrió prácticamente en su totalidad en enero, donde se produjo el 35% de la ETc total. Este valor es levemente inferior a lo expuesto por Giménez (2012a), quien determinó que durante el PC el cultivo evapotranspiró entre el 38 y 40% de la ETc en año “Niño” y “Niña” respectivamente. Esta menor proporción de la ETc experimentada en este año interpretamos que se debió a una menor RS incidente y menor demanda atmosférica durante dicho período y a la alta ETc en diciembre lo que hizo variar las proporciones. En valor absoluto la ETc diaria promedio durante el PC fue de aproximadamente 6,2 mm día⁻¹, similar a los 6,4 mm día⁻¹ de ETc reportados por Callero (2014).

4.2.2. Eficiencia de uso del agua

La eficiencia de uso del agua (EUA) calculada como cociente entre el rendimiento y la ETc para el T1 fue de 22 kg de grano por mm evapotranspirado. El resultado es mayor a los 14,5 kg ha⁻¹ mm⁻¹ obtenidos por Ceriani y Innella (2012). Además, el promedio de EUA reportado por Zwart y Bastiaanssen (2004) quienes encontraron en la literatura que el valor promedio fue 18 kg ha⁻¹ por mm evapotranspirado, variando los valores de EUA entre 11 y 27 kg ha⁻¹ mm⁻¹ cuando se toman como extremos los percentiles 5 y 95 de todos los datos evaluados. En concordancia con esto Hattendorf et al. (1988) determinaron valores de EUA que varían entre 10 y 24 kg ha⁻¹ mm⁻¹.

La mayor EUA de 26 kg ha⁻¹ mm⁻¹ reportada por Callero (2014) se debió a las condiciones ambientales para cada año, ya que con ETc muy similares en el total del ciclo en ambos años, en la temporada 2013 se produjo una alta ETc en la etapa vegetativa pero se vió disminuida en las etapas donde se concreta el rendimiento, particularmente en el llenado de grano.

Estos resultados coinciden con lo expresado por Zwart y Bastiaanssen (2004) quienes mencionan que la EUA y la ETC es afectada por diferentes factores, entre los que destacan el clima, el manejo del suelo y el riego, y mencionan al RD como una alternativa para mejorar los valores de EUA.

4.3. INTERACCIÓN DE LAS VARIABLES CON EL RENDIMIENTO

En el tratamiento con bienestar hídrico se logró mantener los niveles de AD por arriba de los umbrales durante casi todo el ciclo, teniendo breves períodos por debajo, ubicando algunos en el PC. Se caracterizó la temporada por tener altas precipitaciones principalmente en enero y febrero. En consecuencia, se registraron valores de RS incidente por debajo del promedio histórico, en los meses donde además transcurrió el PC de determinación del rendimiento. Estas condiciones tuvieron un efecto negativo limitando la TCC en el PC, por lo que se afectó la fijación de granos, principalmente en la segunda espiga, logrando un menor NG por m² y por lo tanto un menor rendimiento en comparación a años anteriores en la misma localidad.

En el caso del tratamiento en que se expuso a bienestar hídrico únicamente en el PC, el mismo sufrió una intensa y prolongada deficiencia hídrica desde mediados hasta fines de la etapa vegetativa, esencialmente en el mes de diciembre, lo que afectó el crecimiento vegetativo del cultivo. En diciembre se desarrollaron precipitaciones de 48% por debajo del promedio histórico, y en éste mes una RS incidente similar a años anteriores. A pesar de que la condición hídrica fue restablecida rápidamente en el inicio del PC, especulamos que dicha deficiencia pudo afectar el comportamiento fisiológico durante los primeros días del PC, afectando la fijación de granos lo que se tradujo a una disminución del NG. La deficiencia moderada durante el llenado de grano afectó el peso de los mismos y el efecto negativo que hubo sobre ambos componentes, resultó en una disminución del rendimiento.

La estrategia de riego que consistió en mantener al cultivo con bienestar hídrico en el PC y el llenado de grano vio disminuido el crecimiento vegetativo, a raíz de esto, presentó una tendencia a disminuir la TCC en el PC. Como consecuencia el NG fue afectado negativamente y por lo tanto provocó una merma significativa en el rendimiento. El peso de los granos no fue afectado debido a su condición de bienestar hídrico desde inicios del PC hasta madurez fisiológica, en donde se desarrollaron precipitaciones elevadas, por encima del promedio para la localidad.

El tratamiento de riego deficitario presentó déficit hídrico moderado a finales de la etapa vegetativa y durante el PC. Este comportamiento del AD en el suelo no presentó efecto negativo sobre la TCC en PC respecto al T1. A pesar de esto el cultivo

experimentó una tendencia a disminuir el NG por m², no obstante, no generó disminución significativa en el rendimiento.

Por último, el tratamiento en secano presentó una severa deficiencia hídrica en el final de la etapa vegetativa ya que fueron escasas las precipitaciones, lo que generó 15 días con un contenido de AD en el suelo inferior a 10%. Esta etapa se caracterizó por tener un mes de diciembre con inferiores precipitaciones al promedio histórico, sin grandes variaciones en la RS incidente ni en la ETc promedio. En la etapa del PC, el secano no logró superar el umbral de 60% de AD, presentando un escaso crecimiento vegetativo y bajas TCC en el PC. En consecuencia, se obtuvo una muy baja fertilidad de la espiga afectando directamente el NG por espiga, teniendo gran incidencia en el NG m² donde fue significativamente inferior en comparación a todos los tratamientos. En la etapa de llenado de grano se recuperó el AD por las elevadas precipitaciones que se registraron en los meses finales del cultivo generando un peso de 1000 granos similares al obtenido en el T1. El NG fue el componente numérico que provocó que el rendimiento fuera inferior a los otros tratamientos evaluados y especialmente menor al rendimiento promedio para la región.

5. CONCLUSIONES

El rendimiento del cultivo con bienestar hídrico no alcanzó el rendimiento potencial para la localidad, dado que la RS incidente fue 15% inferior a la serie histórica 2002-12 a lo largo de todo el ciclo del cultivo.

Los tratamientos de con bienestar hídrico y con riego deficitario presentaron rendimientos similares dado que no experimentaron prácticamente déficit hídrico a partir de principio del PC. Bajo las condiciones en que se realizó el experimento la estrategia de riego deficitario resultó una buena alternativa dado que se alcanzó igual rendimiento que en el T1 con el 50% de agua de riego aplicada, disminuyendo a la mitad los costos variables del riego.

Dadas las mermas en el rendimiento que se produjeron debido al estrés hídrico ocurrido a finales de la etapa vegetativa no resultó eficiente la estrategia de realizar riego únicamente en el PC. Por ese motivo y dada la enorme variabilidad de las PP en el país, la estrategia de riego sólo en el PC, aparece como una alternativa riesgosa y dependiente de que ocurran PP en la etapa vegetativa y en el llenado de grano para que cubran las necesidades de agua del cultivo en dichas etapas.

En el tratamiento de secano se obtuvo un muy bajo rendimiento producto del intenso y prolongado déficit hídrico experimentado a finales de la etapa vegetativa, en la que el nivel hídrico del suelo fue muy bajo. Posteriormente las altas precipitaciones ocurridas en el PC no alcanzaron para recuperar el contenido de AD por encima del umbral necesario debido que las precipitaciones efectivas fueron poco más del 50% de las totales. El rendimiento de maíz en secano es muy dependiente de la efectividad de las precipitaciones y de la distribución de las mismas.

Resulta pertinente repetir el experimento para poder evaluar mejor las distintas estrategias de riego. A partir del efecto del déficit hídrico prolongado e intenso en la segunda mitad de la etapa vegetativa sobre el rendimiento surge la necesidad de plantear líneas de trabajo con el fin de esclarecer dicho comportamiento. Se identifican dos posibles trabajos, por un lado se podría diferenciar una etapa vegetativa inicial de otra final, o hacer foco puntualmente en los últimos días de la etapa vegetativa y evaluar la transición con diferentes contenidos de agua de manera abrupta o paulatina.

6. RESUMEN

En la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni” ubicada en el departamento de Paysandú, Uruguay, durante el verano 2013-14 se llevó a cabo la evaluación de distintas estrategias de riego sobre el rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays*). Se determinó como éstas afectan el rendimiento del cultivo y sus componentes, la producción de MS y la TCC durante el PC. Para ello se establecieron 5 tratamientos los cuales difirieron en los momentos en que se regaban, siendo los tratamientos: T1= Bienestar hídrico en todo el ciclo, T2= Bienestar hídrico en el PC y deficiencias en ENC, T3= Bienestar hídrico en el PC y en el llenado de grano y deficiencias en la etapa vegetativa, T4= Riego deficitario (50% de agua de riego del T1) y T5= secano. El tratamiento con bienestar hídrico durante todo el ciclo alcanzó un rendimiento de 11534 kg ha⁻¹ mientras que el de riego deficitario controlado fue 10003 kg ha⁻¹ siendo ambos estadísticamente iguales. El tratamiento con deficiencia hídrica solo en la etapa vegetativa tuvo una merma de rendimiento del 38% respecto al T1, mientras que, si, además, tuvo déficits en el llenado de grano la disminución de rendimiento fue 54%. Los tratamientos con deficiencias hídricas en las ENC no presentaron diferencias estadísticas significativas entre ellos en rendimiento, pero si con los otros tratamientos, siendo menor a los T1 y T4. Los T1 y T4 fueron los que alcanzaron mayor número de granos por m² 3377 y 2623 respectivamente, sin presentar diferencias estadísticas significativas entre ellos a pesar de que el T4 presentó una tendencia a disminuir el número de granos. Los T2 y T3 alcanzaron menor número de granos por superficie que el T1, aunque no mostraron diferencias con el T4. En el peso de granos no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos salvo en el T2 que mostró menor peso de granos que el resto. Los tratamientos con riego no mostraron diferencias significativas entre ellos en la TCC en el PC, pero sí mostraron, los T2 y T3, una tendencia a menor TCC con respecto a los T1 y T4. Las TCC en el PC de todos los tratamientos fueron bajas en relación a lo reportado en la bibliografía a nivel mundial como nacional, debido a las condiciones ambientales ocurridas durante dicha etapa. La menor radiación solar incidente, consecuencia de las abundantes precipitaciones y nubosidad ocurridas durante los meses de enero y febrero limitaron el rendimiento del T1, impidiendo alcanzar el rendimiento potencial de la región.

Palabras clave: *Zea mays*; Riego deficitario; Período crítico; Radiación solar incidente.

7. SUMMARY

The evaluation of different strategies of irrigation on corn (*Zea mays*) yields took place during 2013 -2014s summer in the Experimental Station, based in Paysandu, Uruguay. It was determined how those strategies affect yields efficiency and their components as well as the production of dry matter (DM) and the yield growth rate (CGR) during the critical period (CP). Five treatments were defined in which they differed at times that were irrigated. The treatments were: T1 = Hydric welfare during the whole cycle, T2 = hydric welfare in the critical period (CP) and deficiencies in non-critical stages (NCS), T3 = Hydric Welfare in the critical period (CP), grain filling and deficiencies in vegetative stage, T4 =Irrigation deficit (50% of water irrigation on T1) and T5 = dry land. In the first treatment the yield reached 11,534kg ha⁻¹ while the irrigation deficit was 10,003 kg ha⁻¹ being both statistically equals. Treatment with hydric deficiency, only during the vegetative stage, caused losses of 38% comparing with T1, whereas, it also had deficit in grain filling decreased yield was 54%. Treatments with hydric deficiencies during non-critical stages were not shown any statistical differences between them but with other treatments, being lower than T1 and T4. T1 and T4 obtained the greater number of grains per m², 3,377 and 2,623 respectively but without any significant difference between them despite T4 showed a decreasing trend on grain numbers. T2 and T3 have reached lower number of grains per area comparing with T1 but without any difference with T4 treatment. Any difference in terms of grains weight has been found except from T2 which was the lower weight comparing with the rest. Irrigation treatments did not show significant differences between them during the yield growth rate (YGR) in the CP but T2 & T3 have shown lower YGR trend comparing with T1 and T4. The yield growth rates during the critical period were low in all treatments comparing with what it was reported in a worldwide as well as national literature due to the environmental conditions during the stage. As a consequence of higher rainfall and cloudiness along January and February, the solar radiation was lower than expected being limited T1 performance and preventing to reach the entire potential performance of the region.

Keywords: *Zea mays*; Irrigation deficit; Critical period; Solar radiation.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Abrecht, D. G.; Carberry, P. S. 1993. The influence of water deficit prior to tassel initiation on maize growth, development and yield. *Field Crops Research*. 31(1): 55-69.
2. Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. 2006. *Evapotranspiración del cultivo; guías para la determinación de agua de los cultivos*. Roma, FAO. 277 p. (Estudio FAO. Riego y Drenaje. no. 56).
3. Andrade, F. H.; Gardiol, J. 1995. Sequía y producción de los cultivos de maíz, girasol y soja. INTA Balcarce. *Boletín Técnico* no. 132. 23 p.
4. _____; Cirilo, A. G.; Uhart, S. A.; Otegui, M. E. 1996. *Ecofisiología del cultivo de maíz*. Buenos Aires, La Barrosa y Dekalb Press. 292 p.
5. _____; Vega, C.; Uhart, S.; Cirilo, A.; Cantarero, M.; Valentinuz, O. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Science*. 39:453-459.
6. _____; Aguirrezábal, L. A. N.; Rizzalli, R. H. 2002. Determinación del rendimiento en girasol y soja. *IDIA XXI*. 2(3): 102-106.
7. Andriani, J. M. 2002. Estrés hídrico en soja. *IDIA XXI*. 2 (3): 48-51.
8. Azcón-Bieto, J.; Talón, M. 2008. *Fundamentos de la fisiología vegetal*. 2ª. ed. Madrid, ES, Mc Graw Hill Interamericana. 651 p.
9. Baethgen, W. E.; Giménez, A. 2004. La variabilidad climática, el cambio del clima y el sector agropecuario. *In: Jornada Técnica Clima y Respuestas Hídricas de Pasturas en Zonas Ganaderas (2004 Tacuarembó)*. Memorias. Montevideo, INIA. pp. 2-9 (Actividades de Difusión no. 364).
10. _____; Terra, R. 2010. El riego en un clima cambiante. *In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (1º., 2010 Paysandú, Uruguay)*. Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 7-18.
11. Bennett, J. M.; Sinclair T. R.; Muchow R. C.; Costello, S. R. 1987. Dependence of stomatal conductance on leaf water potential, turgor potential, and

relative water content in field-grown soybean and maize. *Crop Science*. 27: 984-990.

12. Bergonci, J. I.; Bergamaschi, H.; Santos, A. O.; França, S.; Radin, B. 2001. Eficiência da irrigação em rendimento de grãos e matéria seca de milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 36(7): 949-956.
13. Boyer, J. S. 1970. Differing sensitivity of photosynthesis to low leaf water potentials in corn and soybean. *Plant Physiology*. 46: 236-239.
14. Çakir, R. 2004. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*. 89(1): 1-16.
15. Callero, H. W. 2014. Maíz, efecto de las deficiencias hídricas sobre el rendimiento. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 51 p.
16. Cárcova, J.; Borrás, L.; Otegui, M. E. 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en maíz. *In*: Satorre, E. H.; Benech, R. L.; Slafer, G. A.; De la Fuente, E.; Miralles, D. J.; Otegui, M. A.; Savin, R. eds. *Producción de granos, bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires, UBA. Facultad de Agronomía. pp. 132-157.
17. Cardellino, G.; Baethgen, W. E. 2000. Análisis de viabilidad de sistemas de riego para maíz. *In*: *Jornada de Cultivos de Verano; Tecnología de Producción de Cultivos y Pasturas (2000, La Estanzuela, Colonia)*. Memorias. Montevideo, INIA. pp. 47 - 55 (Actividades de Difusión no. 227).
18. Carter, G.; Petrella, P. 2013. Estudio de distintas poblaciones y dosis de nitrógeno en maíz bajo riego. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 56 p.
19. Castaño, J. P.; Giménez, A.; Ceroni, M.; Furest, J.; Aunchayna, R.; Bidegain, M. 2011. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009. Montevideo, INIA. 33 p. (Serie Técnica no. 193).

20. Ceriani, M.; Innella, J. A. 2012. Efecto de la fertilización nitrogenada tardía (V10-11) sobre el rendimiento de maíz en condiciones de riego y secano. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 59 p.
21. Cirilo, A. G.; Andrade, F. H. 1994. Sowing date and maize productivity; II. Kernel number determination. *Crop Science*. 34: 1044–1046.
22. _____.; _____. 1996. Sowing date and kernel weight in maize. *Crop Science*. 36: 325–331.
23. Corsi, W. C. 1982. Regionalización agroclimática del Uruguay para cultivos. C.I.A.A.B. Miscelánea no. 40. 29 p.
24. 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.; Miralles, D. J.; Otegui, M. A.; Savin, R. eds. Producción de granos, bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, UBA. Facultad de Agronomía. pp. 375 – 440.
25. Della Maggiora, A. I.; Gardiol, J. M.; Irigoyen, A. I. 2000. Requerimientos hídricos. *In*: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Editorial Médica Panamericana. pp. 155-171.
26. Doorenbos, J.; Pruitt, W. O. 1977. Las necesidades de agua de los cultivos. Roma, FAO. 194 p. (Estudio FAO. Riego y Drenaje no. 24).
27. Earl, H. J.; Davis, R. F. 2003. Effect of drought stress on leaf and whole canopy radiation use efficiency and yield of maize. *Agronomy Journal*. 95(3): 688-696.
28. Eck, H. V. 1986. Effects of wáter déficit on yield, yield components, and water use efficiency of irrigated corn. *Agronomy Journal*. 78: 1035-1040.
29. Ertek, A.; Kara, B. 2013. Yield and quality of sweet corn under deficit irrigation. *Agricultural Water Management*. 129: 138-144.
30. Faraldo, M. L.; Vergara, G. T.; Casagrande, G. A.; Arnaiz, J. P.; Mirasson, H.; Ferrero, C. 2011. Eficiencia en el uso del agua y radicación en maíz, girasol y soja, en la región oriental de la Pampa, Argentina. *Agronomía Tropical*. 61(1): 47-57.

31. Farré, I.; Faci, J. M. 2009. Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a mediterranean environment. *Agricultural Water Management*. 96(3): 383-394.
32. Fassio, A.; Carriquiry, A. I.; Tojo, C.; Romero, R. 1998. Maíz; aspectos sobre fenología. Montevideo, INIA. 47 p. (Serie Técnica no. 101).
33. Fereres, E.; Soriano, M. A. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*. 58(2): 147- 159.
34. Fisher, K. S.; Palmer, F. E. 1984. Tropical maize. *In*: Goldworsthy, P. R.; Fisher, N. M. eds. *The physiology of tropical field crops*. Chichester, UK, Wiley. pp. 213-284.
35. García, F. 2011. Balance de carbono y de nutrientes; buscando el equilibrio en la agricultura del Cono Sur. *In*: Simposio Nacional de Agricultura (2º., 2011, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Paysandú, Hemisferio Sur. pp. 135-147.
36. García, H.; Ferrarotto, M. 2009. Efecto del déficit hídrico sobre la acumulación de biomasa y nitrógeno en soya (*Glycine max*) inoculada con *Bradirhizobium japonicum*. (en línea). Aragua, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. pp. 21-27. Consultado 18 set. 2014. Disponible en http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_agro/article/view/130/108
37. García Petillo, M. 2012. Conceptos básicos para el diseño y el manejo del riego. *In*: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (2º., 2012, Salto, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 23-33.
38. Genta, J. L.; Texeira, L. 2001. Inundaciones y drenaje urbano- Uruguay. *In*: Tucci, C. E. M.; Bertoni, J. C. eds. *Inundações urbanas na América do Sul*. Porto Alegre, Brasil, Asociación Brasileira de Recursos Hídricos. p. irr.
39. Giménez, L. 2012a. ¿Cuánto estamos perdiendo por no regar cultivos en Uruguay? *In*: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (2º., 2012, Salto, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 33-43.

40. _____. 2012b. Producción de maíz con estrés hídrico provocado en diferentes etapas de desarrollo. *Agrociencia* (Montevideo). 16(2): 92-102.
41. _____. 2014a. ¿Que sabemos del riego de cultivos en Uruguay? Y que falta por investigar. In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (3°, 2014, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 22-36.
42. _____.; Canosa G.; Prieto, C.; Grasso, J. P.; Montero, A.; Rameau, M.; Rosa, A.; Arévalo, R. 2014b. Respuesta al riego suplementario en cultivos de verano y evaluación de pérdidas de rendimiento por deficiencias hídricas. In: Giménez, L.; García, M.; Boggiano, P.; Piedrabuena, L. eds. Respuesta riego suplementario en cultivos y pasturas. Montevideo, INIA. pp. 9-28 (FPTA. INIA no. 55).
43. Girona, J.; Bonastre, N.; Marsal, J. 2014. Estrategias de gestión del riego eficiente y sostenible; riego deficitario controlado o una oportunidad inteligente en el uso de recursos naturales. In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (3°, 2014, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 78-96.
44. Hall, A. J.; Vilella, F.; Trapani, N.; Chimenti, C. A. 1982. The effects of water stress and genotype on the dynamics of pollen-shedding and silking in maize. *Field Crops Research*. 5: 349-363.
45. 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.
46. Howell, T. A.; Steiner, J. L.; Schneider, A. D.; Evett, S. R.; Tolk, J. A. 1997. Seasonal and maximum daily evapotranspiration of irrigated winter wheat, sorghum, and corn-Southern High Plains. *Transactions of the ASAE*. 40(3): 623-634.
47. Jama, A. O.; Ottman, M. J. 1993. Timing of the first irrigation in corn and water stress conditioning. *Agronomy Journal*. 85(6): 1159-1164.
48. Jones, R. J.; Shreiber B. M. N.; Roessler, J. A. 1996. Kernel sink capacity in maize; genotypic and maternal regulation. *Crop Science*. 36: 301-306.

49. Kang, S.; Shi, W.; Zhang, J. 2000. An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation. *Field Crops Research*. 67(3): 207-214.
50. Kiniry, J. R.; Ritchie, J. T. 1985. Shade-sensitive interval of kernel number in maize. *Agronomy Journal*. 77: 711-715.
51. Klocke, N. L.; Schneekloth, J. P.; Melvin, S. R.; Clark, R. T.; Payero, J. O. 2004. Field scale limited irrigation scenarios for water policy strategies. *Applied Engineering in Agriculture*. 20(5): 623-631.
52. _____; Currie, R. S.; Tomsicek, D. J.; Koehn, J. 2011. Corn yield response to deficit irrigation. *Transactions of the ASABE*. 54 (3): 931-940.
53. Ko, J.; Piccinni, G. 2009. Corn yield responses under crop evapotranspiration-based irrigation management. *Agricultural Water Management*. 96: 799-808.
54. Lorens, G. F.; Bennett J. M.; Loggale, L. B. 1987. Differences in drought resistance between two corn hybrids. I. Water relations and root length density. *Agronomy Journal*. 79: 802-807.
55. Maddonni, G. A.; Otegui, M. E.; Bonhomme, R. 1998. Grain yield components in maize; II. Postsilking growth and kernel weight. *Field Crops Research*. 56(3): 257-264.
56. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2015. Censo 2014; producción vegetal, cultivos cerealeros e industriales. Montevideo. pp. 49-60.
57. Molfino, J. H.; Califra, A. 2001. Agua disponible en las tierras del Uruguay; segunda aproximación. Montevideo, MGAP. 12 p.
58. Muchow, R. C.; Sinclair, T. R. 1991. Water deficit effects on maize yields modeled under current and greenhouse climates. *Crop Science*. 83: 1052-1059.

59. Nagore, M. L.; Echarte, L.; Andrade, F. H.; Della Maggiora, A. 2013. Crop evapotranspiration in Argentinean maize hybrids released in different decades. *Field Crops Research*. 155: 23-29.
60. NeSmith, D. S.; Ritchie, J. T. 1992a. Effects of soil water deficits during tassel emergence or development and yield components of maize (*Zea mays*). *Field Crops Research*. 28: 251-256.
61. _____.; _____. 1992b. Maize (*Zea mays* L.) response to a severe soil water deficit during grain-filling. *Field Crops Research*. 29: 23-35.
62. _____.; _____. 1992c. Short- and long-term response of corn to a pre-anthesis soil water deficit. *Agronomy Journal*. 84(1): 107-113.
63. 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 Doctoral. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina. Universidad Nacional de Mar del Plata. 93 p.
64. _____.; _____. ; Suero, E. E. 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Research*. 40(2): 87-94.
65. _____.; Melon, S. 1997. Kernel set and flower synchrony within the ear of maize. *Crop Science*. 37: 441-447.
66. _____.; Bonhomme, R. 1998. Grain yield components in maize I. Ear growth and kernel set. *Field Crops Research*. 56(3): 247-256.
67. _____.; Andrade, F. H. 2000. New relationships between light interception, ear growth and kernel set in maize. In: Westgate, M. E.; Bopteds, K. eds. *Physiology and modeling kernel set in maize*. Maryland, USA, ASA/CSSA/SSSA. pp. 89-102 (Special Publication no. 29)
68. Panda, R. K.; Behera, S. K.; Kashyap, P. S. 2004. Effective management of irrigation water for maize under stressed conditions. *Agricultural Water Management*. 66: 181-203.
69. Payero, J. O.; Tarkalson, D. D.; Irmak, S.; Davison, D.; Petersen, J. L. 2009. Efecto del momento de una asignación de déficit de riego en la

evapotranspiración de maíz, el rendimiento, la eficiencia del uso del agua y la materia seca. *Gestión Del Agua Agrícola*. 96 (10): 1387-1397.

70. Piedrabuena, L. 2010. ¿Es viable económicamente el riego extensivo en Uruguay? In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 165-177.
71. Plaut, Z.; Blum, A.; Arnon, I. 1969. Effect of soil moisture regime and row spacing on grain sorghum production. *Agronomy Journal*. 61(3): 344-347.
72. Reddy, V. M.; Daynard, T. B. 1983. Endosperm characteristics associated with rate of grain filling and kernel size in corn. *Maydica*. 28: 339-355.
73. Ritchie, S. W.; Hanway, J. J. 1982. How a corn plant develops. Ames, Iowa, Iowa State University. 16 p. (Special Report no. 48).
74. Ritchie, J. T.; NeSmith, D. S. 1991. Temperature and crop development. In: Hanks, J.; Ritchie, J. T. eds. Modeling plant and soil systems. Madison, WI, ASA/CSSA/SSSA. pp. 5-29 (Agronomy Monograph no. 31).
75. Rivetti, A. R. 2006. Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto, Córdoba, Argentina. *Revista Facultad de Ciencias Agrarias (UN Cuyo)*. 38: 25-36.
76. _____. 2007. Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto, Córdoba, Argentina. *Revista de Facultad de Ciencias Agrarias (UN Cuyo)*. 39: 29-39.
77. 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. 55 p.
78. Ruiz, M.; Núñez, E. s.f. Restricción hídrica aplicada en diferentes ventanas del ciclo del cultivo de maíz. San Juan, AR, INTA. s.p.
79. Sawchik, J.; Formoso, F. 2000. Inserción del riego en rotaciones de cultivos y pasturas. In: Jornada de Cultivos de Verano; Tecnología de Producción

de Cultivos y Pasturas (2000, La Estanzuela, Colonia). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 13-25.

80. _____.; Mas, C.; Pérez Gomar, E.; Bermudez, R.; Pravia, V.; Giorello, D.; Ayala, W. 2010. Riego suplementario en pasturas: antecedentes de investigación nacional. *In*: Seminario Internacional Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 141-145.
81. _____. 2012. Necesidad de riego en cultivos y pasturas. *In*: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (2º., 2012, Salto, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay. INIA. pp. 55-69.
82. Shaw, R. H. 1988. Climate requirement. *In*: Sprague, G. F.; Dudley, J. W. eds. Corn and corn improvement. 3rd. ed. Madison WI, American Society of Agronomy. pp. 609-638 (Agronomy no. 18).
83. Singh, B. R.; Singh, D. P. 1995. Agronomic and physiological responses of sorghum, maize and pearl millet to irrigation. *Field Crops Research*. 42(2): 57-67.
84. Stegman, F. C. 1982. Corn grain yield as influenced by timing of evapotranspiration deficits. *Irrigation Science*. 3: 75-87.
85. Stockle, C. O.; James, L. G. 1989. Analysis of deficit irrigation strategies for corn using crop growth simulation. *Irrigation Science*. 10(2): 85-98.
86. Thompson, L. M. 1986. Climatic change, weather variability and corn production. *Agronomy Journal*. 78: 649-653.
87. Tolck, J. A.; Howell, T. A. 2003. Water use efficiencies of grain sorghum grown in three USA southern Great Plains soils. *Agricultural Water Management*. 59(2): 97-111.
88. Tollenaar, 1977. Sink-source relationship during reproductive development in maize; a review. *Maydica*. 22(2): 49-75.
89. _____.; Daynard, T. B. 1978. Effect of defoliation on kernel development in maize. *Canadian Journal of Plant Science*. 58 (1): 207-212.

90. _____.; Dwyer, L. M.; Stewart, D. W. 1992. Ear and kernel formation in maize hybrids representing three decades of grain yield improvement in Ontario. *Crop Science*. 32(2): 432-438.
91. Traore, S. B.; Carlson, R. E.; Pilcher, C. D.; Rice, M. E. 2000. Bt and non-Bt maize growth and development as affected by temperature and drought stress. *Agronomy Journal*. 92(5): 1027-1035.
92. Trout, T. J. 2012. Water production functions for field crops. *In*: Reunión Internacional de Riego (3°. , 2012, Córdoba). Trabajos presentados. Manfredi, Córdoba, s.e. pp. 51-60. Consultado 18 mar. 2016. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-libro_3_reunin_internacional_de_riego_2012.pdf
93. Vega, C. R.; Andrade, F. H.; Sadras, V. O.; Uhart, S. A.; Valentinuz, O. R. 2001. Seed number as a function of growth. A comparative study in soybean, sunflower, and maize. *Crop Science*. 41(3): 748-754.
94. Zhang, H. 2003. Improving water productivity through deficit irrigation; examples from Syria, the North China Plain and Oregon. *In*: Kinje, J. W.; Barker, R.; Molden, D. eds. *Water productivity in agriculture; limits and opportunities for improvement*. Wallingford, UK, CABI. cap. 19, pp. 301-309.
95. Zwart, S. J.; Bastiaanssen, W. G. W. 2004. Review of measured crop productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural Water Management*. 69: 115–133.