

Respuesta del maíz y la soja a diferentes disponibilidades hídricas en distintas etapas de desarrollo

Giménez L¹

¹ Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Departamento de Producción Vegetal, Estación Experimental «Dr. Mario A. Cassinoni» (EEMAC). Ruta 3, km 363, Paysandú, Uruguay. Correo electrónico: kapoexe@fagro.edu.uy.

Recibido: 2016-06-09 Aceptado: 2017-07-04

Resumen

Los cultivos de maíz y soja difieren tanto en sus procesos fisiológicos como en sus requerimientos ambientales. No obstante, en ambos cultivos la disponibilidad hídrica durante el ciclo de desarrollo es la principal limitante ambiental que determina los rendimientos y la variabilidad de los mismos en cultivos realizados en secano. El trabajo se llevó adelante en el campo experimental de riego de la Estación Experimental «Dr. Mario A. Cassinoni» de la Facultad de Agronomía, ubicada en Paysandú, Uruguay, durante las temporadas 2011 y 2012. El objetivo principal fue cuantificar el impacto de las deficiencias hídricas en distintas etapas de desarrollo sobre el rendimiento de maíz y soja. Para ello se provocaron deficiencias hídricas y bienestar hídrico en diferentes etapas del ciclo de los cultivos, a través de la intercepción de las precipitaciones (PP) y de la aplicación de riego suplementario, de manera de controlar el agua disponible (AD). Los resultados mostraron que las mayores disminuciones del rendimiento ocurrieron con deficiencias de agua acumuladas en la etapa vegetativa y el período crítico (PC) y variaron entre 40 % en maíz y 30 % en soja, con respecto a los testigos regados que presentaron rendimientos de 14,6 t ha⁻¹ y 6,2 t ha⁻¹, respectivamente.

Palabras clave: deficiencias hídricas, etapas de desarrollo, cultivos de verano, agua

Corn and Soybeans Response to Different Water Availability at Various Stages of Crop Development

Summary

Corn and soybean crops differ in both their physiological processes and their environmental requirements. However, water availability during the development cycle is the main environmental factor that determines yields and their variability in rainfed crops. The work was carried out in the irrigation field of the «Dr. Mario A. Cassinoni» Experimental Station of the School of Agronomy located in Paysandú, Uruguay, during 2011 and 2012 seasons. The main objective was to quantify the impact of water deficiencies on corn and soybean yields at different stages of development. In order to do this, water deficiencies and water-comfort conditions were induced at different stages of the crops through interception of precipitation (PP) and supplementary irrigation so as to control the available water (AW). Results showed that the largest decreases in yields occurred when water deficiencies accumulated in the vegetative stages and in the critical period (CP) varying from 40 % in corn and 30 % in soybeans, in comparison to the control treatments which presented yields of 14,6 t ha⁻¹ and 6,2 t ha⁻¹, respectively.

Keywords: water deficiencies, crops development stages, summer crops, water

Introducción

En la agricultura de Uruguay los cultivos de verano realizados en secano son los que presentaron en la última década mayor crecimiento e importancia económica. El maíz y la soja son los principales cultivos estivales desarrollados en secano y el área de siembra actual es cercana a 1.300.000 ha, siendo la leguminosa responsable del 88 % de dicha superficie (DIEA, 2016).

En los últimos años en maíz y soja se han realizado transformaciones tecnológicas significativas, que no incrementaron el rendimiento pero permitieron un apreciable crecimiento de la superficie sembrada. En ese sentido, se destacan los cambios en el laboreo, donde la labranza convencional fue sustituida íntegramente por la siembra directa. Asimismo, las modificaciones en los materiales genéticos han sido sustanciales: las variedades convencionales fueron sustituidas por variedades genéticamente modificadas con resistencia a herbicidas totales y al ataque de lepidópteros (Arbeletche, Coppola y Paladino, 2012). Ambas transformaciones fueron adoptadas en un alto porcentaje de la superficie de soja y maíz. Por otra parte, es importante señalar que la soja presenta un lugar significativo en las exportaciones agropecuarias y en los últimos años alternó en el primer lugar con la carne vacuna (Uruguay XXI, 2015).

La producción de maíz en cambio tiene por objeto abastecer el mercado interno y su uso principal es en raciones para alimentación animal. La inclusión de esta gramínea en los sistemas productivos agrícolas tiene un rol principal, dado el elevado potencial de producción de biomasa de alta calidad para el mantenimiento productivo de los suelos, aportando a incrementar el carbono (C) orgánico y a mejorar la sustentabilidad de los sistemas de producción (Mazzilli et al., 2015).

Por otra parte, se destacan las diferencias entre el maíz y la soja en relación a las características fisiológicas y a los requerimientos ambientales. El maíz es una especie con crecimiento determinado, por el contrario, la soja posee crecimiento indeterminado. Esta característica hace que las condiciones de estrés de origen biótico y abiótico a las cuales están sometidos los cultivos afecten en forma diferencial la producción de biomasa y rendimiento. El crecimiento determinado provoca que el maíz sea altamente susceptible a la variabilidad ambiental, en cambio la soja presenta cierta flexibilidad ante situaciones de estrés.

Los requerimientos del ambiente y la eficiencia de utilización de los factores de producción en ambas especies son distintos por diferentes razones, entre las que se destaca el metabolismo del carbono. El maíz es una especie de tipo

C4 con elevada eficiencia en la transformación de la radiación fotosintéticamente activa en biomasa y grano. En cambio, la soja es una especie C3, con un proceso de fotosíntesis menos eficiente que maíz por la existencia de fotorrespiración. Este es uno de los motivos por los cuales el potencial de producción es menor en soja que en maíz y los valores de eficiencia de uso de la radiación son mayores en el cereal (Cárcova, Borrás y Otegui, 2003). La composición química de los granos es otro aspecto diferencial: mientras en el grano de maíz dominan los carbohidratos, principalmente almidón, en la soja existen elevados contenidos de proteína y aceite en el grano, lo cual implica distintos costos metabólicos (Cárcova, Borrás y Otegui, 2003) a favor del maíz y a su vez requerimientos diferentes de los nutrientes principales. La soja requiere cuatro veces más nitrógeno que el maíz por tonelada de grano producida.

No obstante las diferencias mencionadas entre maíz y soja, la disponibilidad hídrica durante el ciclo de desarrollo es la principal limitante ambiental que determina el rendimiento y la variabilidad del mismo en ambos cultivos realizados en secano (Sawchik y Ceretta, 2005; Giménez y García Petillo, 2011).

Las características por las que la disponibilidad de agua afecta la determinación y la variabilidad de los rendimientos son: 1) la baja capacidad de almacenamiento de agua disponible (AD) de los suelos en relación al consumo de los cultivos, que cubre aproximadamente entre 20 y 30 % de las necesidades hídricas de maíz y de soja (Molfino y Califra, 2001; Giménez y García Petillo, 2011); 2) las elevadas demandas evaporativas atmosféricas durante los meses de verano, en los que se determina mayoritariamente el rendimiento (Baethgen y Terra, 2010; Castaño et al., 2011); 3) la variabilidad en volumen, intensidad y distribución de las precipitaciones (PP) que son la principal fuente de recarga hídrica de los suelos (Castaño et al., 2011).

El efecto de las deficiencias hídricas sobre la producción de biomasa y rendimiento en maíz y soja fue estudiado anteriormente en las temporadas 2009 y 2010 (Giménez, 2012, 2014), no obstante, la evaluación se desarrolló en condiciones climáticas extremas: en la primera temporada por la ocurrencia de excesos hídricos (año «Niño»), en cambio en la segunda temporada se presentaron deficiencias hídricas intensas (año «Niña»). Por este motivo y dada la relevancia de la disponibilidad de agua en la determinación del rendimiento en ambos cultivos, en este trabajo planteamos como objetivo principal cuantificar el impacto de las deficiencias hídricas en distintas etapas de desarrollo sobre el rendimiento de maíz y soja.

Materiales y métodos

El trabajo se desarrolló en el campo experimental de riego de la Estación Experimental «Dr. Mario A. Cassinoni» de la Facultad de Agronomía, ubicado en el departamento de Paysandú, Uruguay a 32° 22' S y 58° 03' W, durante las temporadas 2011 y 2012.

El suelo se caracterizó como un Brunosol sub-éutrico típico (Fine, thermic, superactive, mixed, Pachic Argiudoll), perteneciente a la formación Fray Bentos.

Los ensayos de maíz fueron fertilizados en ambas temporadas sólo con nitrógeno, ya que de acuerdo a los análisis de suelo no hubo necesidad de agregar otros nutrientes. La dosis de nitrógeno fue de 300 kg ha⁻¹ aplicados manualmente, la mitad se agregó en el estadio V6 (Ritchie y Hanway, 1982) y la otra mitad en V10, usando como fuente urea (46-0-0). En la temporada 2012 se fertilizó con la misma dosis, momento y fuente que la utilizada en la temporada anterior. Los ensayos de soja no fueron fertilizados por los motivos anteriormente indicados. El laboreo fue de tipo convencional y se realizó con dos pasajes de rastra excéntrica y rastra de dientes.

Los parámetros hídricos y físicos del suelo del campo experimental se muestran en el Cuadro 1.

Las siembras fueron realizadas con una sembradora experimental el 29 y el 27 de octubre de 2011 y 2012 respectivamente en maíz y el 11 de noviembre de 2011 y el 3 de diciembre de 2012 en soja. Los materiales genéticos utilizados fueron en maíz el híbrido DK 692 de ciclo intermedio y en soja la variedad DM 5.1 RR del GM V.

Las parcelas estuvieron compuestas por cinco surcos de 5 m de longitud, y la distancia entre hileras en maíz fue de 0,7 m y en soja de 0,4 m. La población objetivo en maíz fue de 100.000 plantas ha⁻¹ y en soja 350.000 plantas ha⁻¹, en ambos casos se logró en forma ajustada.

El control químico de malezas en maíz se realizó con el herbicida Atrazina a dosis de 1 L ha⁻¹ PC, la aplicación se

realizó antes de la siembra. En soja se realizaron dos aplicaciones de herbicida glifosato por temporada a razón de 1,5 L ha⁻¹ cada una.

Los tratamientos de maíz evaluados fueron:

T1 = Sin deficiencias hídricas.

T2 = Deficiencias hídricas en el PC, definido como 15 días antes del inicio de la floración femenina a 15 días después de la misma. En 2011-12 el PC se ubicó entre el 23/12 y 21/01 y en 2012-13 entre el 26/12 y 24/01.

T3 = Deficiencias hídricas en el llenado de grano, definido como la etapa entre la finalización del PC y la madurez fisiológica. En 2011-12 las deficiencias hídricas en este tratamiento se ubicaron entre las fechas 22/01 y 13/03 y en la temporada 2012-13 se ubicaron entre 25/01 y 28/02.

T4 = Deficiencias hídricas durante la fase vegetativa y el PC, estas etapas se ubicaron desde la emergencia del cultivo, la cual ocurrió 14 y 7 días después de la siembra en 2011 y 2012 respectivamente, y la finalización del PC.

T5 = Secano.

Los tratamientos en soja evaluados fueron:

T1 = Sin deficiencias hídricas.

T2 = Deficiencias hídricas en el PC definido entre las etapas R4 a R6 (Fehr y Caviness, 1977). En 2011-12 el PC se ubicó entre el 24/01 y el 23/02 y en la temporada 2012-13 entre el 12/02 y el 12/03.

T3 = Deficiencias hídricas en las etapas no críticas (ENC) previas al PC las que abarcaron las etapas vegetativas y desde R1 a R3. En 2011-12 la ubicación de estas etapas fue entre el 25/11 y el 23/01 y en la temporada 2012-13 entre el 10/12 y el 11/02.

T4 = Deficiencias en la etapa vegetativa y el PC, en 2011-12 ubicada desde el 25/11 y el 26/12 y desde el 24/01 al 23/02 y en 2012-13 desde el 10/12 hasta el 24/1 y desde el 12/02 al 12/03.

T5 = Secano.

Cuadro 1. Composición granulométrica y parámetros hídricos del suelo del campo experimental de riego de la Estación «Dr. M.A. Cassinoni».

Profundidad de horizonte (m)	Textura (%)			Contenido hídrico del suelo, cm ³	
	Arena	Limo	Arcilla	CC	PMP
0-0,20	31	46,5	22,5	0,3	0,14
0,20-0,60	25,3	39,2	35,5	0,4	0,26
0,60-1,00	22,2	40,4	37,4	0,32	0,18

CC y PMP son los contenidos de agua en el suelo correspondientes a capacidad de campo y al punto de marchitez permanente respectivamente.

Los T1, T2, T3 y T4 de los ensayos fueron generados mediante dos tipos de intervenciones en la disponibilidad hídrica de los cultivos: a) riego suplementario y b) interceptación de las PP por medio de la colocación de simuladores de sequía, en los tratamientos definidos con deficiencias hídricas. Los simuladores de sequía parcelarios y móviles fueron construidos en estructuras de acero cubiertas de lona impermeable. En maíz la dimensión de los simuladores fue de 3,5 m de ancho 5 m de longitud y 2,5 m de altura máxima. En el caso de soja la dimensión fue de 2 m de ancho, 5 m de longitud y 1,5 m de altura. Las estructuras presentaron techos a dos aguas, dos paredes laterales, una frontal y una trasera. Los simuladores fueron colocados inmediatamente antes de cada evento de PP y retirados inmediatamente después, intentando no modificar las condiciones de radiación solar y temperaturas.

El riego se realizó por un sistema de goteo con cintas ubicadas en cada hilera de cultivo con goteros cada 0,2 m y un caudal por gotero de $1,49 \text{ L h}^{-1}$, se aplicó riego en los tratamientos con deficiencias hídricas de acuerdo a la variación del porcentaje de AD, el cual fue estimado a través de un balance hídrico de suelos simplificado de paso diario. Los mm de riego totales fueron calculados por el tiempo de riego y el riego efectivo fue considerado el 90 % del riego total. Las variaciones del contenido de agua en el suelo fueron calculadas mediante la expresión: $\Delta S = \text{PP efectiva}$

+ R efectivo - ETC, siendo: ΔS = variación de AD (mm), R = riego (mm). Las PP totales fueron medidas en un pluviómetro ubicado en el campo experimental y las PP efectivas fueron estimadas para cada evento y valoradas como el máximo de mm hasta alcanzar la capacidad de campo a la profundidad radicular estimada. La ETC (mm) fue calculada diariamente de la siguiente manera $E_{Tc} = E_{To} \times K_c$, siendo E_{To} la evapotranspiración del cultivo de referencia (mm), la cual fue estimada utilizando la ecuación de FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) y K_c = coeficiente de cultivo se utilizaron los propuestos por FAO (Allen et al., 1998), en ausencia de información nacional. Los parámetros climáticos para estimar la E_{To} fueron medidos a través de una estación meteorológica automática Vantage Pro 2TM, modelo 6510 (Davis Instruments, Hayward, CA), ubicada a 2000 m del campo experimental de riego de la EEMAC.

El inicio del riego durante el PC fue determinado cuando el contenido hídrico del suelo descendió por debajo de 60 % AD y en las ENC por debajo de 40 % AD, a 0,7 m que fue la profundidad máxima radical estimada. La finalización del riego se realizó cuando el AD llegó a 90 %. En los tratamientos con deficiencias hídricas, el AD se dejó descender hasta 20 % y luego se regó hasta el 40 % en ENC y hasta el 60 % de AD en PC.

En los Cuadros 2 y 3 se presentan las PP totales y efectivas y el riego total y efectivo, en cada tratamiento y

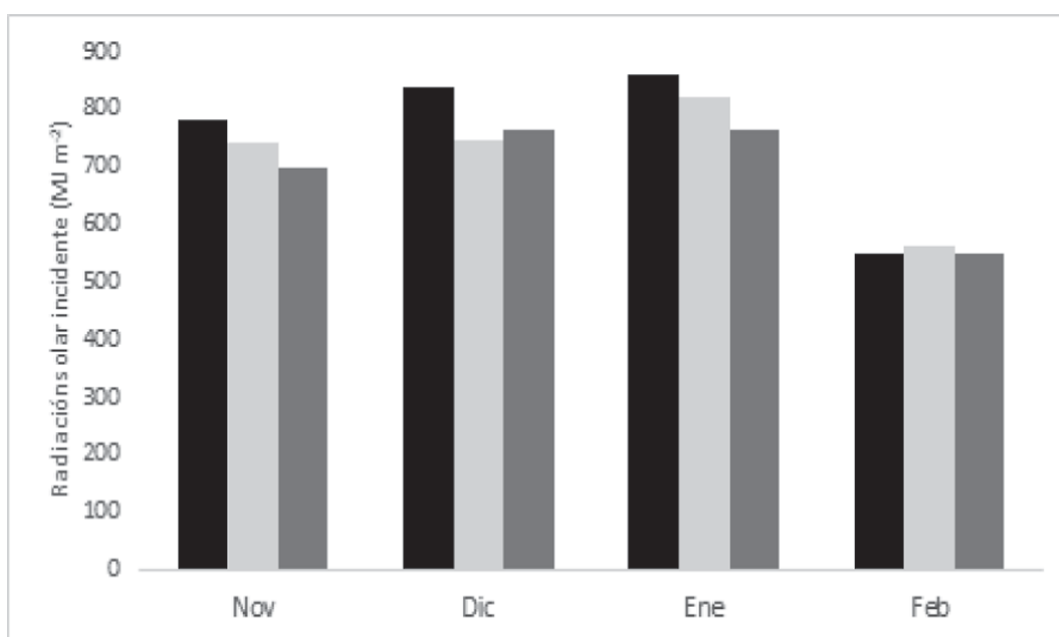


Figura 1. Radiación solar (MJ m^{-2}) mensual para los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero de las temporadas: 2011 (columnas negras), 2012 (columnas grises claro) y serie histórica 1988 - 2012 (columnas grises oscuro).

Cuadro 2. Precipitaciones totales, precipitaciones efectivas y riegos totales y riegos efectivos para las temporadas 2011 y 2012, en los diferentes tratamientos de maíz evaluados: T1 = bienestar hídrico, T2 = deficiencias hídricas en el período crítico, T3 = deficiencias hídricas en el llenado de grano, T4 = deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y el período crítico y T5 = secoano.

Temporadas	Precipitaciones totales (mm)		Precipitaciones efectivas (mm)		Riego total (mm)		Riego efectivo (mm)	
	2011	2012	2011	2012	2011	2012	2011	2012
Tratamiento								
T1	674	552	251	256	371	54	334	49
T2	498	429	308	266	0	178	0	160
T3	632	513	258	221	162	223	146	201
T4	324	444	215	256	54	153	49	138
T5	674	552	373	399	-	-	-	-

Cuadro 3. Precipitaciones totales y efectivas y riegos totales y efectivos para las temporadas 2011 y 2012, en los diferentes tratamientos de soja evaluados: T1 = sin deficiencias hídricas, T2 = deficiencias hídricas en el período crítico, T3 = deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y desde R1 a R3, T4 = deficiencias hídricas en etapa vegetativa y el período crítico y T5 = secoano.

Temporadas	Precipitaciones totales (mm)		Precipitaciones efectivas (mm)		Riego total (mm)		Riego efectivo (mm)	
	2011	2012	2011	2012	2011	2012	2011	2012
Tratamiento								
T1	698	671	298	268	428	354	385	319
T2	698	652	306	281	246	234	221	211
T3	480	633	277	256	396	256	356	230
T4	552	529	184	261	147	165	132	149
T5	698	671	328	415	-	-	-	-

temporada de estudio, para maíz y soja, respectivamente. En la Figura 1 se muestra la radiación solar (RS) incidente entre los meses de noviembre y febrero para ambas temporadas estudiadas y para la serie histórica entre 1988 y 2012. Para corroborar la evolución del agua disponible en el suelo y posibles ingresos de PP en las etapas planificadas con deficiencias hídricas se midió el contenido hídrico del suelo mediante un equipo de sonda de neutrones CPN modelo 503DR HIDROPROBE.

En las Figuras 2 y 3 se muestra la evolución del porcentaje de AD para los diferentes tratamientos evaluados, en las dos temporadas de estudio en maíz y soja, respectivamente. Cabe aclarar que en el T4 de maíz en la temporada 2010 por errores en la intercepción de PP se produjeron

dos ingresos de agua no planificados durante la etapa vegetativa.

Las cosechas de maíz fueron realizadas el 13/3/12 y el 28/2/13, el rendimiento fue estimado a partir de 9 m lineales de plantas de los tres surcos centrales de cada parcela. En la superficie de cosecha se determinó el número de plantas m^{-1} , el número de espigas por planta y el número de granos (NG) por espiga, y con esa información se calculó el $NG\ m^{-2}$ y se midió el peso de mil granos (PG) promedio de cada parcela.

En soja las cosechas se realizaron el 09/04/12 y el 15/04/13, el rendimiento fue estimado a partir de la cosecha de 9 m lineales de plantas de los tres surcos centrales de cada parcela. En la superficie cosechada se determinó el $NG\ m^{-2}$ y se midió el PG promedio.

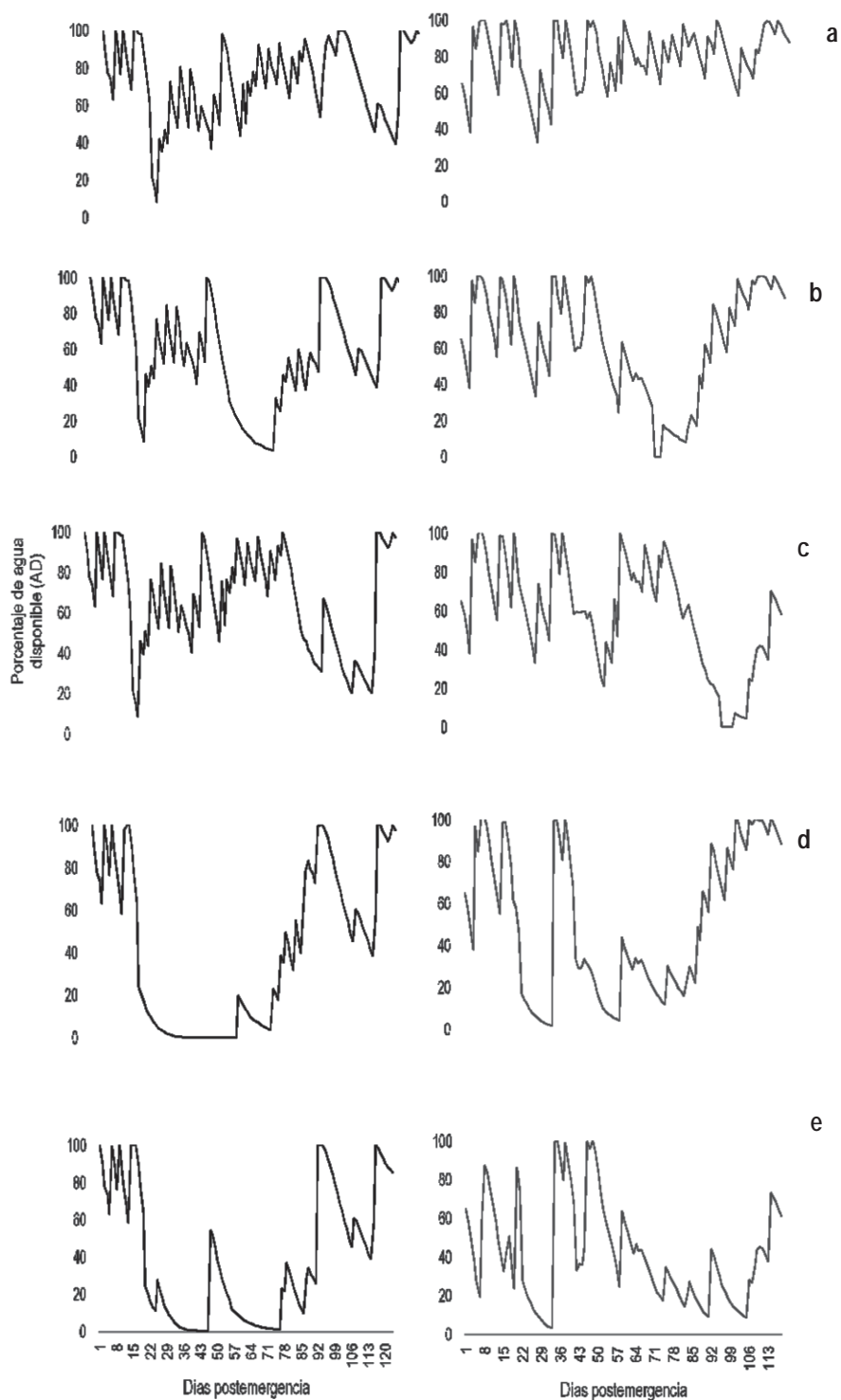


Figura 2. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD) de maíz, a la izquierda la temporada 2011 y a la derecha la temporada 2012, en los tratamientos evaluados: a) bienestar hídrico (T1), b) deficiencias hídricas en el período crítico (T2), c) deficiencias hídricas en el llenado de grano (T3), d) deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y en el período crítico (T4) y e) secano (T5).

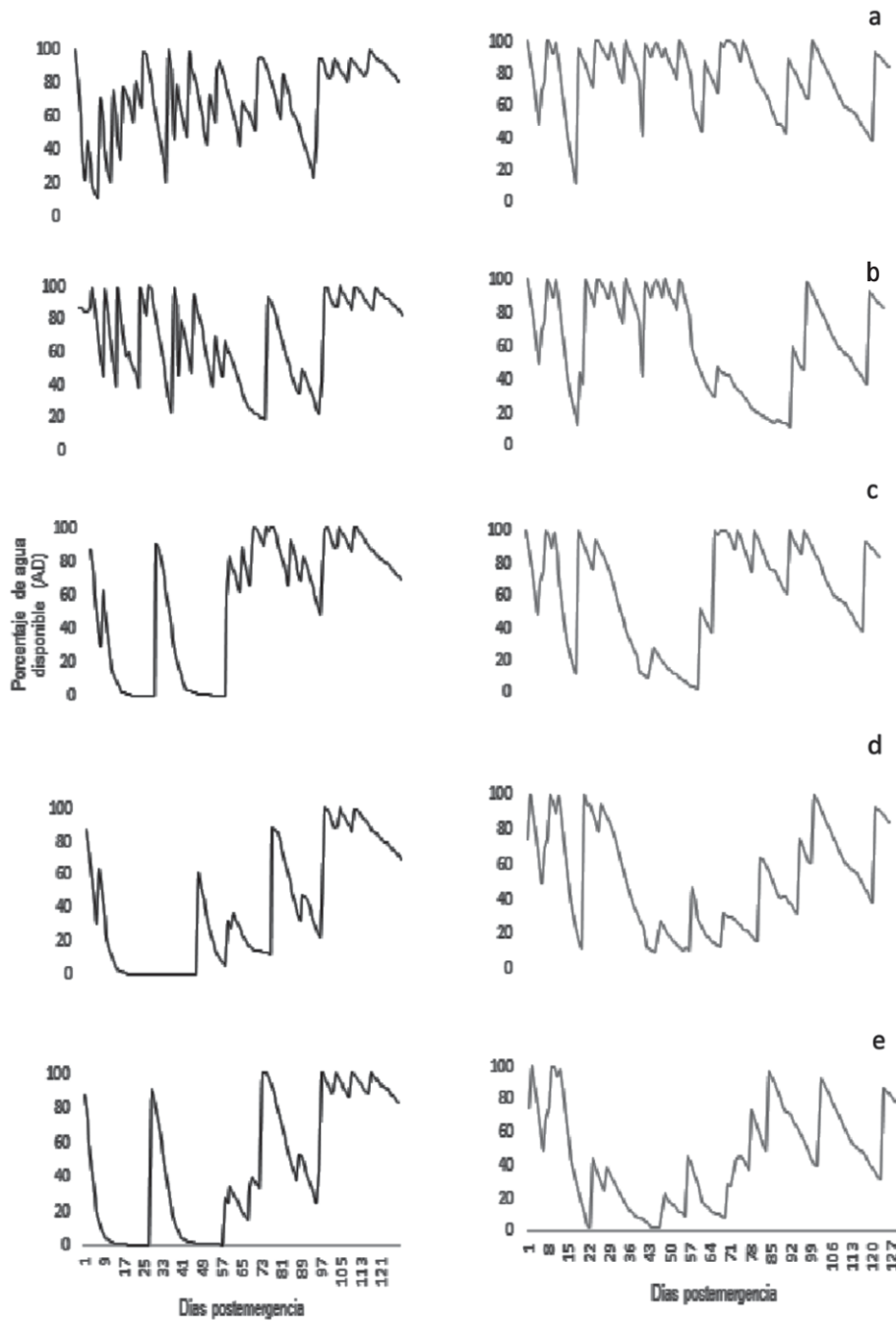


Figura 3. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD) de soja, a la izquierda la temporada 2011 y a la derecha la temporada 2012, en los tratamientos evaluados: a) bienestar hídrico (T1), b) deficiencias hídricas en el período crítico, (T2); c) deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y entre las etapas R1 y R3 (T3), d) deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y el período crítico (T4) y e) secano (T5).

El diseño experimental utilizado en los cuatro ensayos fue bloques completamente aleatorizados, ajustándose el modelo $Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$ donde: μ es la media general, τ es

el efecto de los tratamientos, β es el efecto de los bloques, ϵ es el error experimental, siendo i : tratamientos 1, 2, 3, 4 y 5 y j = bloques 1, 2 y 3. Las variables estudiadas fueron:

rendimiento, NG por m², PG promedio y biomasa de la parte aérea, y se realizaron análisis de varianza considerando los efectos de tratamientos, los años y la interacción entre ambos. Las diferencias de medias fueron comparadas mediante el test de Tukey con un nivel de significación del 5 %. El paquete estadístico utilizado fue SAS v 9.2.

Resultados y discusión

Maíz

En la Figura 4 se muestra el rendimiento y la biomasa aérea total obtenidos en los tratamientos evaluados, para ambas temporadas. El rendimiento promedio del T1 fue de 14,6 t ha⁻¹ y la biomasa total producida promedio fue de 25 t ha⁻¹. El rendimiento con bienestar hídrico se encuentra en el rango de los máximos logrables sin limitaciones hídricas ni nutricionales y con manejo óptimo, dados los valores de RS incidente promedio de la región (Andrade et al., 1996).

En las temporadas 2011 y 2012 la RS incidente total durante los meses de noviembre a febrero fue de 3026 y 2864 MJ m⁻², respectivamente, estos valores fueron 9 y 4 % superiores al promedio para la localidad. Los valores de RS elevados en ambas temporadas (Figura 1), sustentan la obtención de rendimientos altos en los T1, ya que cuando se controla la disponibilidad hídrica y el manejo del cultivo no presenta deficiencias, los rendimientos dependen mayoritariamente de la radiación fotosintética activa interceptada, que correlaciona positivamente con la RS incidente (Cárcova, Borrás y Otegui, 2003).

Los tratamientos con deficiencias hídricas provocadas (T2, T3 y T4) presentaron diferencias estadísticas significativas con el tratamiento de bienestar hídrico (T1), no detectándose en el análisis conjunto interacción entre tratamiento y año. Asimismo, los tratamientos que incluyeron deficiencias de agua en el PC (T2 y T4) fueron los que mostraron las disminuciones en el rendimiento mayores en relación al T1, sin embargo, no se detectaron diferencias significativas entre el T3 y el T2. Las pérdidas de rendimiento en los tratamientos con deficiencias en el PC variaron aproximadamente entre 30 y 40 % y los valores mayores fueron constatados en el T4. En maíz el entorno de la floración es la etapa crítica en la productividad del cultivo; las deficiencias de agua en esta etapa disminuyen el rendimiento debido a que afectan negativamente el crecimiento del cultivo, causando trastornos fisiológicos y afectando el NG fijados.

En la Figura 5 se muestra la tasa de crecimiento de cultivo (TCC) durante el PC en los diferentes tratamientos

evaluados, se constató que en los T2 y T4 fueron sensiblemente menores a las obtenidas en el T1, no obstante, el T1 presentó diferencias significativas solo con el T4 y el T5. El NG logrado por unidad de superficie es función del crecimiento del cultivo durante el PC y las TCC son indicadores de la capacidad del cultivo para fijar granos (Andrade et al., 1996). Esto ocurre porque en el maíz existe una fuerte dominancia apical y en situaciones de estrés hídrico la espiga es relegada en la translocación de fotoasimilados ante la panoja masculina y por ese motivo es afectada negativamente la diferenciación y la viabilidad de los granos con la consecuente disminución del rendimiento (Hall, Lemcoff y Trápani, 1981; Westgate y Boyer, 1985; Grant et al., 1989). La literatura sugiere que las deficiencias hídricas durante el PC pueden provocar disminuciones de hasta 40 y 50 % del rendimiento en maíz (Cakir, 2004; Giménez, 2012).

La biomasa aérea total fue afectada por las deficiencias hídricas en porcentajes menores que el rendimiento, en el T2 la biomasa total se redujo 21 % y en el T4 las disminuciones fueron de aproximadamente 30 %, y se detectaron diferencias significativas de ambos tratamientos en relación al T1.

Las deficiencias hídricas provocadas durante el llenado de grano (T3) generaron disminuciones del rendimiento y la biomasa de 20 y 21 % respectivamente; se detectaron diferencias significativas para ambas variables con el T1. No se encontraron diferencias en rendimiento y biomasa entre el T3 y el T2, y entre el T3 y el T4 se detectaron diferencias significativas en el rendimiento y no en la biomasa. Importa aclarar que el T4 presentó dos ingresos de agua no planificados durante la etapa vegetativa que posiblemente incrementaron la producción de biomasa, sin embargo se estima que no afectaron el rendimiento dada la menor influencia de esta etapa del ciclo en la producción de granos. El estrés hídrico en el llenado de granos posee menores efectos sobre el rendimiento que el PC debido a que no afecta directamente al NG, pero sí tiene efectos en el PG. Las deficiencias en la etapa de llenado de granos además reducen la fotosíntesis y aceleran la senescencia foliar del cultivo (Fisher y Palmer 1984; Ouattar, Jones y Crokston, 1987).

Los tratamientos en secano (T5) presentaron los menores rendimientos y las producciones de biomasa más bajas, sin embargo, en ninguno de estos parámetros se detectaron diferencias con el T4. Como se observa en la Figura 3 en una parte importante del ciclo de los T5 hubo un contenido de AD por debajo del 40 %, es decir con deficiencias hídricas. Los secanos en la región en general no

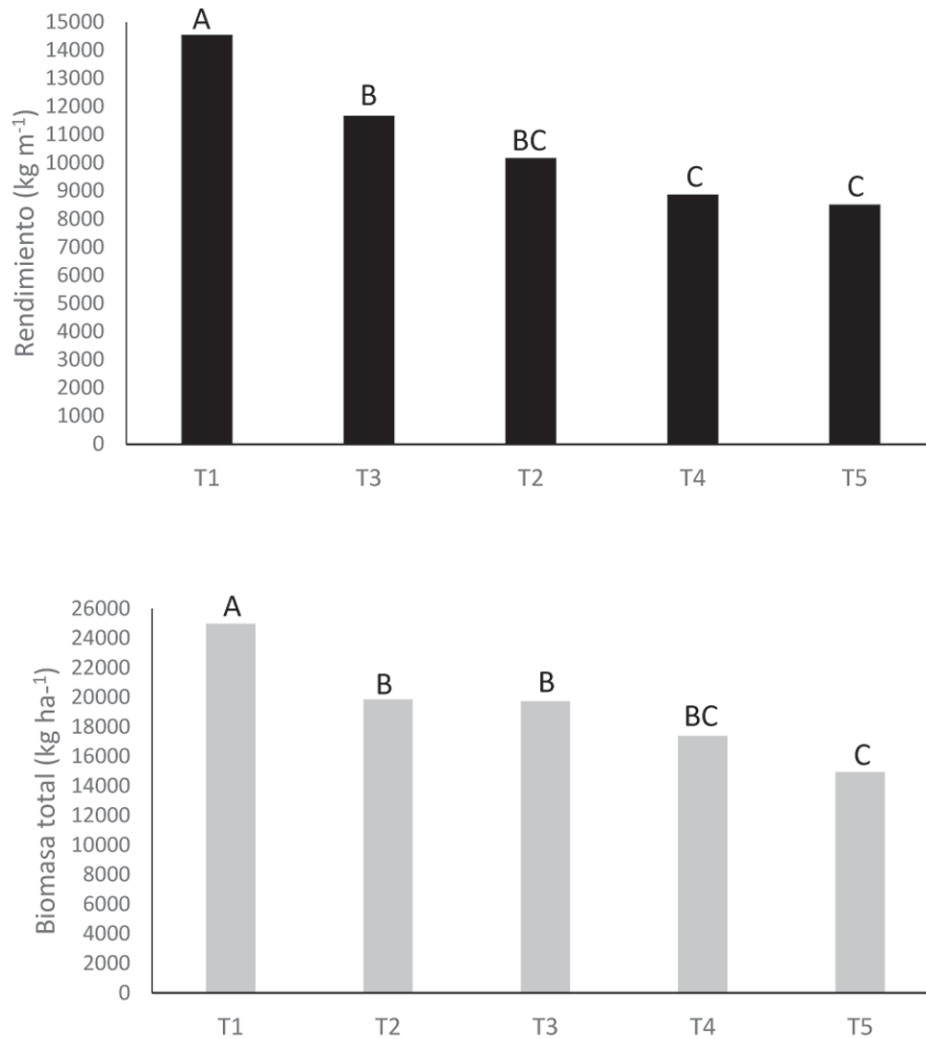


Figura 4. Rendimiento (kg ha⁻¹) y biomasa total (kg ha⁻¹) promedios para las temporadas 2011 y 2012, en los tratamientos de maíz evaluados: T1 = bienestar hídrico, T2 = deficiencias hídricas en el período crítico, T3 = deficiencias hídricas en el llenado de grano, T4 = deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y el período crítico y T5 = seco. Las letras diferentes indican diferencias significativas (P ≤ 5 %).

cubren las necesidades hídricas de los cultivos y los rendimientos bajo estas condiciones son variables y dependientes de las PP de cada temporada.

En el Cuadro 4 se muestran los componentes numéricos del rendimiento, es decir el NG m⁻² y el PG promedio, en los diferentes tratamientos y temporadas evaluadas. Los T1 y T3 lograron el NG por superficie más elevado, estos resultados se explican debido a que, en ambos tratamientos durante el PC de determinación del rendimiento, no presentaron deficiencias hídricas, por tanto, no fue afectado el NG m⁻².

Los efectos de las deficiencias de agua en el PC sobre los rendimientos se deben a que la disponibilidad hídrica

afecta el estado fisiológico del cultivo y el mismo es determinante en la fijación de los granos. La TCC en el PC es un buen indicador del estado fisiológico del cultivo, si no se logran TCC elevadas en esta etapa el NG fijado disminuye en relación al potencial y existe una afectación negativa del rendimiento. En la temporada 2011 se fijó un mayor NG m⁻² que en 2012 y el PG promedio presentó una tendencia inversa. Esto se explicó por ser el PG un componente residual del rendimiento. En la temporada 2012 se fijó un NG menor que el potencial y es posible que posteriormente en la etapa de llenado de grano la disponibilidad de fotosíntidos fuera abundante posibilitando de esa manera obtener un PG elevado.

Cuadro 4. Número de granos (NG) por metro cuadrado y peso promedio de granos (PG) en maíz, en los tratamientos evaluados: T1 = bienestar hídrico, T2 = deficiencias hídricas en el período crítico, T3 = deficiencias hídricas en el llenado de grano, T4 = deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y el período crítico y T5 = seco.

Tratamiento	Número de granos m ⁻²	Peso de grano (mg)
T1 (*)	5459 A	272 A
T2	3318 B	293 A
T3	5184 A	228 B
T4	3072 B	289 A
T5	3477 B	241 B
CV (%)	25	6,8
MDS	1258	23

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticas significativas ($P \geq 5\%$).

El T2 mostró una disminución del NG en relación al T1 de 39 % dadas las deficiencias hídricas provocadas durante el PC, las cuales afectaron el crecimiento del cultivo y las pérdidas de rendimiento fueron de 31 % (Cuadro 4 y Figura 4). Las TCC del T2 fueron inferiores a las obtenidas en el

T1, afectando directamente la fijación del NG y el rendimiento. Como era de esperar, el T4 presentó un NG por superficie bajo, debido a las deficiencias hídricas provocadas durante el PC. Las disminuciones del NG fueron de 38 % en relación al T1, y las pérdidas en el NG del T4 y del T2 fueron similares debido a que ambos tratamientos presentaron deficiencias de agua en el PC.

El T5 mostró un NG por superficie bajo, en concordancia con la escasa disponibilidad hídrica durante el PC. No se detectaron diferencias significativas en este parámetro entre T2, T4 y T5.

El T3 presentó el PG menor entre los tratamientos evaluados. Esto se debió a que el PG se define principalmente en la etapa de llenado de granos. Como componente residual del rendimiento, el PG depende también del NG determinado en el PC. El T3 mostró un NG elevado y las deficiencias hídricas provocadas en la etapa de llenado de granos produjeron disminuciones en el crecimiento del cultivo. Como consecuencia el PG fue afectado negativamente. En cambio, en los T2 y T4 el PG fue elevado, incluso mayor que el obtenido en el T1, dado que el NG fue bajo y la disponibilidad hídrica elevada durante el llenado de granos, lo que permitió un mayor crecimiento del cultivo en esta etapa y como consecuencia la obtención de un PG alto. Sin embargo, el rendimiento fue bajo debido a la menor importancia del PG en la determinación del rendimiento.

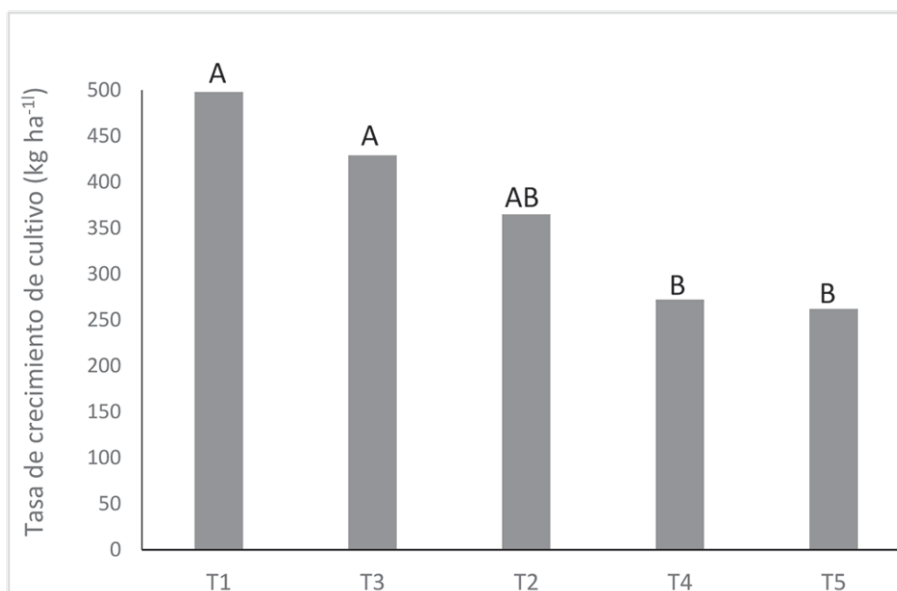


Figura 5. Tasa de crecimiento de maíz (kg ha⁻¹) de materia seca en el período crítico (PC) de determinación del rendimiento promedio para las temporadas 2011 y 2012, en los tratamientos evaluados: T1 = bienestar hídrico, T2 = deficiencias hídricas en el período crítico, T3 = deficiencias hídricas en el llenado de grano, T4 = deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y el período crítico y T5 = seco. Las letras diferentes indican diferencias significativas ($P \geq 5\%$).

De acuerdo a los resultados, se puede inferir que el rendimiento no se relacionó con el PG en maíz. Los T2 y T4 presentaron un PG elevado y un rendimiento bajo en relación al T1 y T3. Este comportamiento se debió a que el componente principal del rendimiento es el NG por m² y el mismo no se compensa por un PG alto. El T1 mostró PG intermedios y la residualidad de este componente del rendimiento fue notoria. En la medida que el NG fue alto, el PG promedio fue bajo o medio. Se infiere que este comportamiento se debió a la escasez de fotoasimilados durante la etapa de llenado de grano. En el T5 el PG varió principal-

mente de acuerdo a las PP ocurridas en la etapa de llenado de granos, ubicándose en 2012 con menores PG que el T3 debido a una menor disponibilidad hídrica en la etapa (Figura 3).

Soja

En la Figura 6 se muestran los resultados obtenidos de rendimiento y biomasa total aérea de soja para los diferentes tratamientos evaluados. El rendimiento promedio del tratamiento con bienestar hídrico durante todo el ciclo (T1) fue de 6,2 t ha⁻¹ aproximadamente. El T1 presentó el mayor

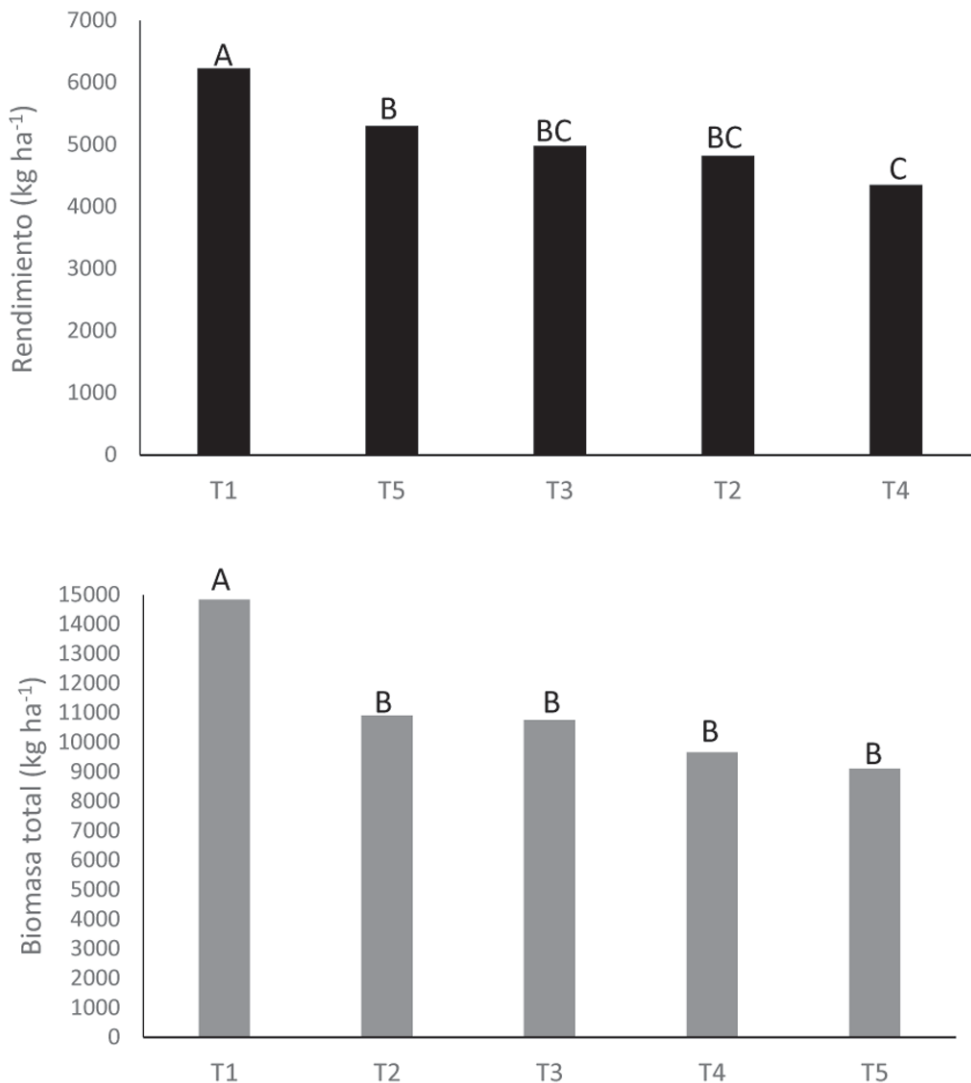


Figura 6. Rendimiento (kg ha⁻¹) y biomasa aérea total (kg ha⁻¹) de soja promedio para las temporadas 2011 y 2012 en los tratamientos evaluados: T1 = sin deficiencias hídricas, T2 = deficiencias hídricas en el período crítico, T3 = deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y desde R1 a R3, T4 = deficiencias hídricas en etapa vegetativa y en el período crítico y T5 = seco. Las letras diferentes indican diferencias significativas (P ≤ 5%)

rendimiento y mostró diferencias significativas con los restantes tratamientos evaluados, y no se detectó interacción entre tratamiento y año. Si bien en la localidad se han logrado rendimientos experimentales superiores en temporadas con RS incidente y temperaturas elevadas (Giménez, 2014), se considera que la productividad obtenida en el T1 es cercana a los rendimientos máximos posibles para los ambientes de producción del litoral norte. De acuerdo a Salvaggiotti et al. (2008), el rango del rendimiento potencial de soja a nivel mundial es de 6 a 8 t ha⁻¹. Por tanto, se constató a nivel experimental nuevamente que levantando las limitantes hídricas y con manejo óptimo y elevado potencial genético de las variedades utilizadas, los ambientes productivos del litoral norte permiten lograr rendimientos cercanos a los potenciales de la especie, en el entorno de 6 t ha⁻¹ (Canosa y Prieto, 2013; Giménez, 2014).

En la temporada 2011 en el T1 se logró producir 16 t ha⁻¹ de biomasa aérea total, en cambio en la temporada 2012 el máximo volumen fue de 13,7 t ha⁻¹: se infiere que esta diferencia se debió a la mayor RS incidente total que hubo en la primera temporada del estudio (Figura 1). El T1 presentó la mayor producción de biomasa total y mostró diferencias significativas con los restantes tratamientos. En situaciones de agua no limitante se destaca la respuesta productiva que posee la soja a valores elevados de temperaturas y RS (Cooper, 2003). Los resultados obtenidos muestran coincidencia con este aspecto. A pesar que la soja es una especie de tipo fotosintético C3, se detectó mayor producción de biomasa en condiciones de RS incidente elevadas. Las pérdidas de rendimiento evaluadas por deficiencias hídricas durante el PC (T2) ubicado entre las etapas R4 y R6 fueron de 1,4 t ha⁻¹ aproximadamente, implicando reducciones de 23 % del rendimiento en relación al T1. En la temporada 2011 se constató en este tratamiento un ingreso de agua a las parcelas debido a PP no interceptadas durante el PC en el día 76 postemergencia. Esto hizo que el cultivo a partir de la mitad del PC presentara contenidos de AD en el suelo superiores al 60 %, es decir que en la segunda mitad del PC no se registraron deficiencias hídricas en el T2.

Por ese motivo, se estima que en la temporada 2011, la disminución del rendimiento del T2 fue menor a la que se habría obtenido si el tratamiento se hubiera ejecutado de acuerdo a la planificación realizada. Andriani et al. (1991) detectaron pérdidas de rendimiento de 40 % por deficiencias hídricas en el PC de soja y Giménez (2014) constató disminuciones de 45 a 50 % del rendimiento por causa de estrés hídrico en la misma etapa.

En el caso del T3 en que las deficiencias de agua no incluyeron al PC pero se acumularon en la etapa vegetativa y entre las etapas R1 y R3, la disminución del rendimiento fue de 1,2 t ha⁻¹, implicando pérdidas de 20 % en relación al T1. Las pérdidas de rendimiento del T4 con deficiencias acumuladas en la etapa vegetativa y el PC fueron de 1,9 t ha⁻¹ aproximadamente y las disminuciones porcentuales de 30 % en referencia al T1. Las disminuciones de rendimiento constatadas en el T4 fueron las mayores en soja, aunque se detectaron diferencias significativas solo con el T1 y el T5. En trabajos anteriores, las mayores pérdidas de rendimiento se obtuvieron en los tratamientos con deficiencias sólo durante el PC (Giménez, 2014). Sin embargo, los resultados coinciden en que cuando las deficiencias de agua se ubican entre las etapas R4 y R6 solamente o acompañadas por deficiencias también en la etapa vegetativa, las pérdidas de rendimiento son máximas.

En el T5 las diferencias en rendimiento con el T1 fueron de 0,9 t ha⁻¹ aproximadamente, implicando pérdidas sólo de 15 %. En las dos temporadas evaluadas, durante los meses de febrero, en los que se ubicó mayoritariamente el PC, ocurrieron PP abundantes. Esta situación, que causó buena disponibilidad hídrica en esta etapa, justificó que el rendimiento de los secanos fuera elevado en 2011 y también en 2012.

En el Cuadro 5 se muestran los componentes numéricos del rendimiento, es decir el NG m⁻² y el PG promedio, en los diferentes tratamientos. El T1 presentó el NG m⁻²

Cuadro 5. Número de granos (NG) por metro cuadrado y peso promedio de granos (PG) en soja, en los tratamientos evaluados: T1 = sin deficiencias hídricas, T2 = deficiencias hídricas en el período crítico, T3 = deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y desde R1 a R3, T4 = deficiencias hídricas en etapa vegetativa y el período crítico y T5 = secano.

Tratamiento	Número de granos m ⁻²	Peso de grano (mg)
T1(*)	3891 A	178 B
T2	2172 B	195 A
T3	2646 B	175 B
T4	1965 B	187 AB
T5	2640 B	178 B
CV (%)	14,8	9,8
MDS	1033	44

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticas significativas ($P \leq 5\%$).

más elevado y diferencias significativas con los restantes tratamientos evaluados. Como se indicó, el rendimiento obtenido fue el más alto en ambas temporadas, sin embargo el PG logrado fue bajo.

En cambio, en el T2 y el T4 con deficiencias hídricas en el PC, el NG fue bajo y el PG relativamente elevado. Se concluyó que la compensación que se presentó entre los componentes numéricos del rendimiento fue notoria. En soja, al igual que en maíz, se constató la importancia del NG por superficie en la determinación del rendimiento y la jerarquía de la disponibilidad hídrica durante el PC en la definición de este componente.

Por el contrario en el T2 y en el T4 con deficiencias hídricas durante el PC los efectos negativos en la fijación del NG fueron significativos. En el T3 con deficiencias acumuladas en la etapa vegetativa y la floración, el NG por superficie fue mayor que en el T2 y en el T4 aunque no se detectaron diferencias significativas. Se presentaron diferencias con el T1, debido a que en el T3 fueron afectadas por estrés hídrico las etapas entre R1 y R3.

El NG en soja se determina definitivamente entre las etapas R4 y R6, es decir en la etapa de llenado de granos, esto ocurre debido al crecimiento indeterminado de la especie. Durante esta etapa, la competencia por fotoasimilados de las vainas de distinto tamaño es elevada, y en la medida que no existan suficientes fotoasimilados ocurre un ajuste del número de vainas. Las más pequeñas pueden llegar a abortar, afectando directamente el NG m², por lo tanto el NG definitivo se determina entre R4 y R6. En ese sentido, el estado fisiológico de las plantas es clave. En la medida en que la planta se encuentre en buen estado, es decir sin deficiencias en los diferentes factores de crecimiento, podrá disponer de los fotoasimilados suficientes y mantener un número superior de vainas, y con ello fijar un NG m² más elevado. Las deficiencias hídricas en las etapas reproductivas anteriores a R4-R6, es decir entre R1 y R3, que incluyen la floración, provocan cierta afectación del NG. Esta afectación es menor que cuando las deficiencias ocurren entre R4 y R6, por ello esta etapa es el período más crítico de determinación del rendimiento.

En el T5 el NG por superficie y el PG promedio fueron variables de acuerdo a la distribución y ocurrencia de las PP debido a la jerarquía que presenta la disponibilidad hídrica en el estado fisiológico del cultivo. Pero como se dijo anteriormente, en ambas temporadas las PP fueron relativamente elevadas, permitiendo obtener rendimientos altos en seco.

Conclusiones

El bienestar hídrico durante todo el ciclo permitió rendimientos promedio para ambas temporadas de 14,6 t ha⁻¹ en maíz y de 6,2 t ha⁻¹ en soja. En ambos cultivos, las deficiencias hídricas acumuladas entre la etapa vegetativa y el PC mostraron las mayores disminuciones del rendimiento. En maíz las pérdidas durante estas etapas fueron de 40 %, en tanto que en soja la disminución del rendimiento fue de 30 % en relación a los cultivos sin limitantes hídricas. Las disminuciones porcentuales en la biomasa total de maíz fueron menores que las constatadas en el rendimiento, en cambio en soja las pérdidas porcentuales en biomasa de los tratamientos que incluyeron deficiencias en el PC fueron superiores que las ocurridas en el rendimiento. El componente numérico del rendimiento más afectado por las deficiencias hídricas en ambos cultivos fue el NG por superficie, excepto cuando las deficiencias se ubicaron en el llenado de grano de maíz, en que el componente que disminuyó más fue el PG.

La capacidad de compensación de la soja hizo que las disminuciones del rendimiento ante deficiencias hídricas fueran menores que las obtenidas en maíz. El maíz no posee la plasticidad vegetativa y reproductiva característica de la soja, que provoca que las disminuciones del rendimiento no sean mayores cuando las etapas con estrés alternan con etapas de bienestar hídrico. La información generada hasta el presente no permite concluir que el aporte de agua en el PC sea una alternativa válida para planificar riego suplementario. Sin embargo, los resultados de estos ensayos pueden ser útiles para generar y evaluar estrategias de riego deficitario controlado en maíz y soja, atendiendo al diferente comportamiento productivo de los cultivos ante deficiencias hídricas en las distintas etapas de desarrollo.

Agradecimientos

El autor desea agradecer a INIA por financiar el proyecto FPTA 261 y hacer posible la ejecución de los experimentos. Al funcionario del campo experimental de la EEMAC Sr. Richard Arévalo por el esmerado trabajo de campo y de laboratorio desarrollado en el proyecto. A los Ings. Agrs. G. Canosa, C. Prieto y W. Callero por su dedicación en los trabajos de tesis de grado.

Bibliografía

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Roma: FAO. (Irrigations and Drainage, 56).

- Andrade, F. H., Cirilo, A., Uhart, S. y Otegui, M. E. (1996). *Ecofisiología del cultivo de maíz*. Balcarce: INTA Balcarce.
- Andriani, J. M., Andrade, F. H., Suero, E. E. y Dardanelli, J. L. (1991). Water deficits during reproductive growth of soybeans: I. Their effects on dry matter accumulation, and its components. *Agronomie*, 11, 737-746.
- Arbeletche, P., Coppola, M. y Paladino, C. (2012). Análisis del agro-negocio como forma de gestión empresarial en América del Sur: el caso uruguayo. *Agrociencia (Uruguay)*, 16(2), 110-119.
- Baethgen, W. E. y Terra, R. (2010). El riego en un clima cambiante. En *Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas: 1er Seminario Internacional potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas* (pp. 7-18). Recuperado de <http://www.grupodesarrolloriego.uy/pdf/Libro-1-Seminario-Internacional-de-Riego-en-Cultivos-y-Pasturas.pdf>
- Cakir, R. (2004). Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*, 89, 1-16.
- Canosa, G. y Prieto, C. (2013). *Estudio del efecto de las deficiencias hídricas sobre el rendimiento de soja* (Tesis de grado). Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Montevideo.
- Cárcova, J., Borrás, L. y Otegui, M. E. (2003). Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en maíz. En E. H. Satorre, R. L. Benech, G. A. Slafer, E. B. de la Fuente, D. J. Miralles, M. E. Otegui y R. Savin. (Eds.). *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo* (pp. 133-163). Buenos Aires: Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Castaño, J. P., Giménez, A., Ceroni, M., Furest, J. y Ahunchaina, R. (2011). *Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009*. Montevideo: INIA. (Serie Técnica, N° 193).
- Cooper, R. L. (2003). A delayed flowering barrier to higher soybean yields. *Field Crops Research*, 82, 27-35.
- DIEA. (2016). *Resultado de la encuesta agrícola invierno 2016*. Montevideo: MGAP.
- Ferh, W. R. y Caviness C. E. (1977). *Stages of soybean development*. Iowa: Iowa State University. (Special Report, 80).
- Fischer, K. S. y Palmer, F. E. (1984). Tropical maize. En P. R. Goldsworthy y N. M. Fischer (Eds.). *The physiology of tropical field crops* (pp. 213-248). New York: Wiley.
- Giménez, L. (2012). Producción de maíz con estrés hídrico provocado en diferentes etapas de desarrollo. *Agrociencia (Uruguay)*, 16(2), 92-102.
- Giménez, L. (2014). Efecto de las deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo sobre el rendimiento de soja. *Agrociencia (Uruguay)*, 18(1), 53-64.
- Giménez, L. y García Petillo, M. (2011). Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 15(2), 100-108.
- Grant, R. B., Jackson, B., Kiniry, J. y Arkin, G. (1989). Water deficit timing effect on yield components in maize. *Agronomy Journal*, 81, 61-65.
- Hall, A., Lemcoff, J. y Trápani, N. (1981). Water stress before and during flowering in maize and its effects on yield, its components, and their determinants. *Maydica*, 26, 19-38.
- Mazzilli, S. R., Kemanian, A. R., Ernst, O. R., Jackson, R. B. y Piñeiro, G. (2015). Greater humification of belowground than aboveground biomass carbon into particulate soil organic matter in no-till corn and soybean crops. *Soil Biology and Biochemistry*, 85, 22-30.
- Molfino, J. y Califra, A. (2001). *Agua disponible en las tierras del Uruguay: Segunda aproximación*. Montevideo: MGAP.
- Ouattar, S., Jones, R. J. y Crookston, R. K. (1987). Effect of water deficit during grain filling on the pattern of maize kernel growth and development. *Crop Science*, 27, 726-730.
- Ritchie, S. W. y Hanway, J. J. (1982). How a corn plant develops. Iowa: Iowa State University. (Special Report, 48).
- Salvaggiotti, F., Cassman, K. G., Specht, J. E., Walters, D. T., Weiss, A. y Dobermann, A. (2008) Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Research*, 108(1), 1-13.
- Sawchik, J. y Ceretta, S. (2005). Consumo de agua por sojas de distinto grupo de madurez en diferentes ambientes de producción. En *Jornada Técnica de cultivos: Trabajos presentados* (pp. 41-45). Montevideo: INIA. (Actividades de Difusión, 417).
- Uruguay XXI. (2015). *Informe de comercio exterior: Exportaciones e importaciones de Uruguay: Julio 2015*. Recuperado de <http://www.uruguayxxi.gub.uy/informacion/wp-content/uploads/sites/9/2015/08/Informe-de-comercio-exterior-Julio-2015-Uy-XXI.pdf>
- Westgate, M. E. y Boyer, J. S. (1985). Carbohydrate reserves and reproductive development at low leaf water potentials in maize. *Crop Science*, 26, 951-956.