

Giménez L.¹, Canosa G.², Prieto, C.², Grasso J.P.², Montero, A.², Rameau M.², Rosa A.², Arévalo R.³

¹Departamento de Producción Vegetal
Facultad de Agronomía.

² Tesista.

³ Becario.

Respuesta al riego suplementario en cultivos de verano y evaluación de pérdidas de rendimiento por deficiencias hídricas

Proyecto FPTA 261

Período de Ejecución: May. 2009-Set. 2012

INTRODUCCIÓN

La agricultura nacional se modificó significativamente en los últimos años, la superficie sembrada se multiplicó por cuatro aproximadamente entre 2000 y 2012 (MGAP-DIEA, 2013). Asimismo, la actividad agrícola que era mayoritariamente invernada y dominada por trigo y cebada, se transformó en principalmente estival con un predominio marcado del cultivo de soja. Con las transformaciones producidas se modificaron las limitantes ambientales más importantes y los principales problemas del manejo agrícola. Los cultivos de verano realizados en secano, poseen como principal limitante la disponibilidad hídrica en primavera y verano, y como consecuencia ésta es la determinante fundamental del rendimiento. Cuando la disponibilidad de agua no es adecuada a los requerimientos en las diferentes etapas de desarrollo, los cultivos disminuyen su potencial productivo.

La disponibilidad hídrica de los cultivos de verano está determinada por tres factores relacionados a la oferta y a la demanda de agua, a saber:

a) El inicio de la estación de crecimiento de los cultivos de verano está limitado por las temperaturas, esto provoca que las siembras se deban comenzar en los meses de setiembre en maíz y de octubre en soja y sorgo, y por lo tanto las etapas de mayor importancia en la determinación del rendimiento se ubican en los meses de mayor demanda atmosférica (diciembre, enero y febrero).

b) La capacidad de almacenamiento de agua disponible en la mayoría de los suelos es relativamente baja en relación al consumo de los cultivos, la misma puede cubrir aproximadamente entre el 20 y 30 % del consumo, esta limitante de los suelos genera una gran dependencia de las recargas hídricas.

c) Las recargas de agua en los suelos del país proviene casi exclusivamente de las precipitaciones (PP) y el régimen de éstas posee como característica principal la elevada variabilidad, tanto en volumen como en intensidad, y en general no cubren las demandas atmosféricas en las etapas críticas de determinación del rendimiento.

Cuando la disponibilidad de agua es limitante y se encuentra por debajo de los umbrales requeridos, la transpiración de los cultivos se reduce y la disminución depende directamente de características del cultivo como la capacidad para absorber agua, el sistema radicular, el ajuste osmótico y de factores del suelo como el contenido de agua disponible (AD) y la conductividad hidráulica. Las reducciones en la transpiración provocan descensos en la fijación de CO₂ y como consecuencia en la producción de biomasa e índice de cosecha (Fereris y Soriano, 2007).

En cultivos de verano realizados en secano existe alta dependencia de las recargas hídricas para satisfacer las demandas (Sawchik, 2012). La disponibilidad de agua es la responsable principal de la falta de estabilidad productiva y de

la brecha entre los rendimientos potenciales y los obtenidos a nivel comercial. El rendimiento potencial se encuentra determinado por factores no modificables del ambiente como la radiación solar, las temperaturas y los suelos, así como por factores de manejo modificables como: fecha de siembra, densidad de plantas, distancia entre hileras, fertilización y el control de malezas, plagas y enfermedades. La información nacional sobre rendimientos potenciales en cultivos de verano, excepto en arroz, es escasa, ya que mayoritariamente la investigación se ha realizado en secano, el conocimiento de los mismos posee valor como punto de referencia para saber las brechas de rendimiento entre diferentes manejos del agua. Asimismo, conocer la respuesta productiva de los cultivos a diferentes disponibilidades hídricas en las distintas etapas de desarrollo, es un aspecto relevante para definir las mejores estrategias de riego suplementario. Este trabajo tuvo por objetivo principal cuantificar las disminuciones del rendimiento en maíz, soja y sorgo, producidas por deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló en el campo experimental de riego de la Estación Experimental «Dr. M. A. Cassinoni» de la Facultad de Agronomía, ubicado en Paysandú a 32° 22' S y 58° 03' O, durante las temporadas 2009-10, 2010-11 y 2011-12.

El suelo es un Brunosol sub-éutrico típico, perteneciente a la formación Fray Bentos y a la unidad San Manuel, Altamirano *et al.* (1976). El análisis químico realizado el primer año experimental indicó: 3,3 % de MO y 10 ppm de P.

En el primer año el suelo se fertilizó con 120 kg ha⁻¹ de P-PO₄, utilizando como fuente súper fosfato triple de calcio (0-46-46-0), se aplicó previo al laboreo y se incorporó con el mismo. En 2010 y 2011 los análisis indicaron 20 y 15 ppm de P en suelo respectivamente, por lo que no fue necesario fertilizar. La fertilización nitrogenada en maíz y sorgo se realizó a razón de 300 kg ha⁻¹ de N en cada año de estudio, se fraccionó la dosis en dos partes iguales a V6 y V12, la fuente utilizada fue urea. El laboreo fue de tipo convencional y se realizó con rastra de discos excéntrica y rastra de dientes. Los parámetros hidrológicos principales del suelo se muestran en el Cuadro 1.

En las Figuras 1 y 2 se presentan las precipitaciones (PP) y la radiación solar, respectivamente, para cada temporada evaluada y para el promedio entre los años 2002 y 2012.

Se realizaron tres ensayos por año correspondiendo uno a cada cultivo en estudio: maíz, soja y sorgo. Los tratamientos evaluados en cada ensayo fueron cinco y estuvieron compuestos por diferentes disponibilidades de agua en las distintas etapas de desarrollo de los cultivos.

En maíz y sorgo los tratamientos fueron los siguientes:

- T1= Sin deficiencias hídricas
- T2= Deficiencias hídricas en el periodo crítico (PC)
- T3= Deficiencias hídricas en el llenado de grano
- T4= Deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y en el PC
- T5= Secano

Cuadro 1. Profundidad de los horizontes (A, B y total) y parámetros hídricos y físicos del suelo del campo experimental de la EEMAC.

Horizonte	Profundidad (cm)	CC (1) (mm)	PMP (2) (mm)	DA (3) (g cm ⁻³)	CAAD (4) (mm)
A	0-20	54	28	1,25	26
B	20-70	205	125	1,34	80
A-B	0-70	259	153		106

1) Capacidad de campo, 2) Punto de marchitez permanente, 3) Densidad aparente, 4) Capacidad de almacenamiento de agua disponible.

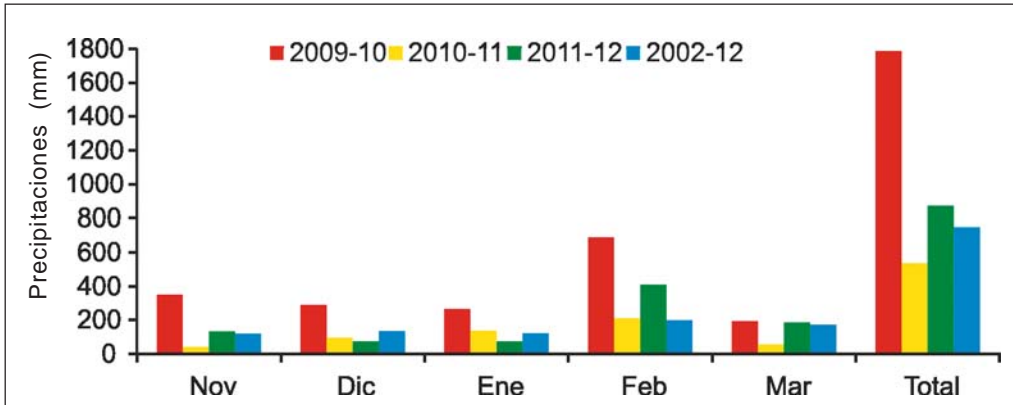


Figura 1. Precipitaciones (mm) mensuales y totales entre los meses de noviembre y marzo, para las temporadas 2009-10, 2010-11 y 2011-12 y el promedio entre 2002 y 2012.

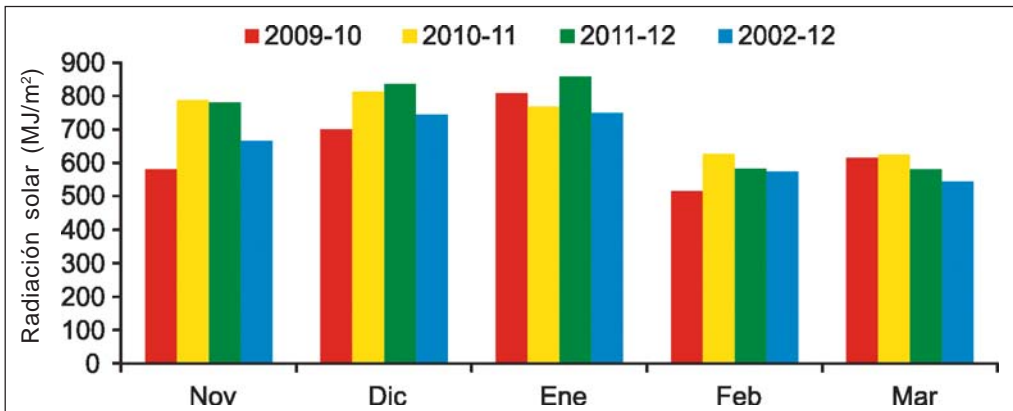


Figura 2. Radiación solar acumulada mensual (MJ/m^2) entre los meses de noviembre y marzo para las temporadas 2009-10, 2010-11 y 2011-12 y el promedio entre 2002 y 2012.

En soja los tratamientos fueron:

- T1= Sin deficiencias hídricas
- T2= Deficiencias hídricas en el PC (R4-R6, Fehr y Caviness, 1977)
- T3= Deficiencias hídricas en etapa vegetativa y floración (R1- R2, Fehr y Caviness, 1977)
- T4= Deficiencias hídricas en etapa vegetativa y PC
- T5= Secano

Los T1, T2, T3 y T4 de los experimentos fueron provocados por medio de dos tipos de intervenciones en la disponibilidad hídrica de los cultivos: a) riego suplementario y b) colocación de simuladores de sequía durante los eventos de PP con el objetivo de interceptar el ingreso de agua a las parcelas en los tratamientos con deficiencias hídricas.

El riego se realizó por un sistema de goteo, con cintas con goteros cada 0,2 m

y un caudal de $1,49 \text{ l h}^{-1}$. Se aplicó el agua de riego de acuerdo a la variación del porcentaje de AD del suelo, el cual fue estimado a través de un balance hídrico de suelos simplificado de paso diario. Las variaciones del contenido de agua en el suelo fueron calculadas mediante la expresión: $\Delta S = PP + R - ETc$

siendo: ΔS = variación de AD (mm), R= riego (mm) y ETc = evapotranspiración de cultivo (mm), calculada como $ETc = ETo \times Kc$, siendo ETo la evapotranspiración del cultivo de referencia (mm), la cual se estimó a través de la ecuación de FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) y para los Kc = coeficiente de cultivo, se utilizaron los propuestos por FAO (Allen *et al.*, 1998). Los parámetros climáticos para estimar la ETo fueron medidos a través de una estación meteorológica automática, ubicada en la EEMAC, aproximadamente a 2000 m del sitio experimental.

Se determinó el inicio de cada riego en el PC cuando el contenido hídrico del suelo descendió de 60 % AD y en las etapas no críticas (ENC) de 40 % AD, a la profundidad radicular estimada. La finalización del riego se realizó cuando el porcentaje de AD llegó a 90 %. En los tratamientos con deficiencias hídricas el porcentaje de AD se dejó descender hasta 20 % y luego se regó hasta llegar a 40 % en las ENC y 60 % AD en el PC.

Los simuladores de sequía utilizados fueron construidos en hierro con cubiertas de lona impermeable, las dimensiones de los mismos para soja y sorgo fueron de 2 m de ancho, 5 m de largo y 1,5 m de altura máxima y para maíz el ancho fue de 3,5 m, la longitud de 5 m y la altura máxima de 2,5 m. Los simuladores se colocaron inmediatamente antes de cada evento de PP y fueron retirados inmediatamente después del mismo, intentando no modificar sustancialmente



Figura 3.



Figura 4.

las condiciones de radiación solar y temperaturas. Las parcelas estuvieron limitadas externamente por una ronda de 0,2 m de altura construida en tierra, para impedir la entrada de agua de escurrimiento. En cada parcela se construyó un desagüe para evacuar el agua de lluvia proveniente de los techos de los simuladores.

En las Figuras 3, 4 y 5 se muestran los simuladores de sequía utilizados en las parcelas con deficiencias hídricas planificadas.

El consumo de agua de los tratamientos fue estimado a través de la medición del contenido hídrico del suelo mediante un equipo de sonda de neutrones CPN modelo 503DR HIDROPROBE. Las mediciones de agua se realizaron semanalmente cada 0,1 m, en tubos de acceso de aluminio de 1 m de longitud y 2 pulgadas de diámetro.

En cada tratamiento se midió el rendimiento en grano y los componentes principales del rendimiento. Asimismo, se estimaron los consumos de agua de los cultivos en las distintas estrategias de disponibilidad hídrica.

Los datos fueron analizados estadísticamente a través del programa InfoStat Profesional versión 2013, se realizó para cada variable un análisis de varianza y la comparación entre medias a través del estadístico Tuckey al 5 %.

Manejo de los cultivos

Maíz

Las siembras fueron realizadas con sembradora experimental en las fechas del 22, 27 y 29 de octubre de 2009, 2010 y 2011, respectivamente. El híbrido utilizado fue DK 692 de ciclo intermedio. Las parcelas de los ensayos estuvieron compuestas por 5 surcos, de 5 m de longitud sembrados a una distancia entre hileras de 0,7 m. La población lograda fue de 100.000 plantas ha⁻¹. El control químico de malezas se realizó con Atrazina a una dosis de 1,5 l ha⁻¹ de producto comercial, la aplicación se realizó previamente a la siembra y se incorporó con el laboreo. Se efectuó en cada temporada una aplicación de insecticida Clorpirifos a dosis de

fue realizada el 16 de marzo de 2011 y 2012, respectivamente. En la superficie de cosecha se determinó: el número de panojas, el número de granos por panoja y con esta información se calculó el número de granos metro cuadrado y se midió el peso promedio de grano.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Maíz

Rendimiento en grano

En la Figura 6, se muestra el rendimiento en grano obtenido en los diferentes tratamientos evaluados en las tres temporadas de estudio. Se observa que en el T1 sin deficiencias hídricas, el rendimiento varió entre 13 y 15 t ha⁻¹ aproximadamente. Los menores rendimientos en el T1 se obtuvieron en la temporada 1, como consecuencia de las características climáticas extremas en dicha temporada que presentaron PP muy superiores a los promedios del país (Figura 1) que provocaron una baja radiación solar incidente durante la mayor parte del ciclo, dado el número elevado de días nublados. Estas características climáticas impidieron una mayor fijación de CO₂ y como consecuencia se afectó en forma negativa la producción de biomasa y rendimiento en grano. En las temporadas 2 y 3, no se presentaron factores de clima extremos y los rendimientos obtenidos fueron del entorno de las 15 t ha⁻¹. El rendimiento logrado en el T1 en los tres años evaluados, concuerda con resultados experimentales anteriores obtenidos en el país (Roselli y Teixeira, 1998; Giménez, 2000; Giménez *et al.* 2002; Puppo *et al.* citados por Baccino, 2002).

A partir del análisis de los resultados no se aprecian en la última década, cambios significativos en el rendimiento de maíz desarrollado con agua no limitante, debido a que los mismos coinciden con los reportados anteriormente. Las variaciones entre años que ocurren en el rendimiento de maíz con riego, se deben principalmente a los cambios producidos entre años, en otros factores climáticos como la radiación solar y el régimen térmico.

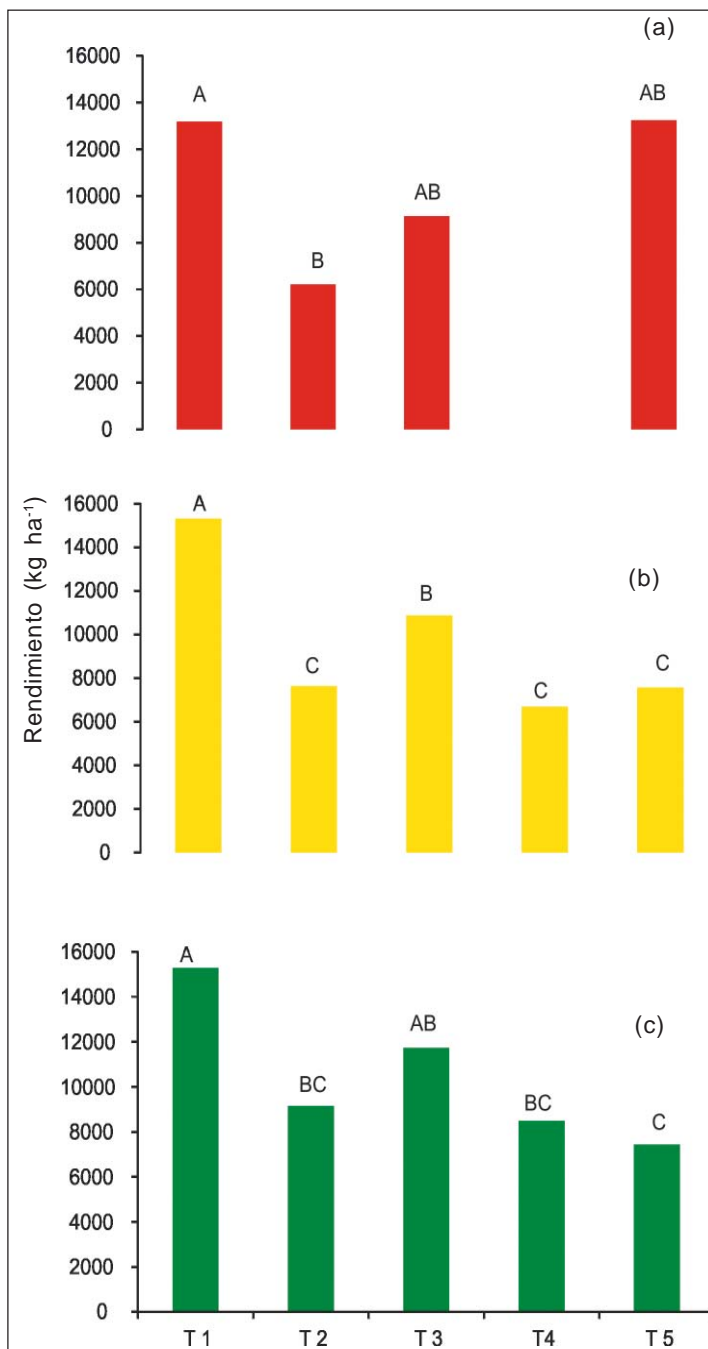


Figura 6. Rendimiento en grano (kg ha⁻¹) de maíz para los tratamientos evaluados en las temporadas 2009-10 (a), 2010-11 (b) y 2011-12 (c).

La información obtenida confirmó que los rendimientos en grano en maíz con riego durante todo el ciclo son elevados. Las variaciones entre años dependen de las características climáticas de cada año, principalmente del comportamiento de las PP, radiación solar y temperaturas. En los años «Niño» con excesos de

PP, los rendimientos potenciales disminuyen y se ubican en el valor inferior del rango mencionado. En cambio, en los años «Niña» con PP por debajo del promedio y elevada radiación solar sin deficiencias hídricas, se obtienen los mayores rendimientos.

En relación al efecto de las deficiencias hídricas en las distintas etapas de desarrollo del maíz, se constató que las mayores disminuciones del rendimiento se produjeron en el T2 y en el T4, o sea cuando las deficiencias hídricas fueron provocadas en el PC y cuando se acumularon en la etapa vegetativa y el PC, respectivamente. Se confirmó el valor que posee la disponibilidad hídrica en el PC de maíz (Andrade, 1996). Asimismo, se cuantificó que la disminución del rendimiento del T2 en relación al T1 varió entre 6,1 y 7,7 t ha⁻¹ aproximadamente, esto implicó mermas de los rendimientos de 40 a 53 % por deficiencias de agua en el PC. En el caso de las deficiencias hídricas acumuladas en la etapa vegetativa y el PC evaluadas en el T4, se obtuvieron pérdidas de rendimiento que variaron entre 6,8 y 8,6 t ha⁻¹, implicando disminuciones de 44 a 56 %, en relación al T1. De los resultados se deduce que las deficiencias hídricas en las etapas vegetativas, agregaron escasas pérdidas del rendimiento (4 a 6 %) en relación a las ocurridas sólo durante el PC.

Las deficiencias hídricas provocadas en la etapa de llenado de grano y evaluadas en el T3, mostraron menores efectos sobre los rendimientos que las provocadas en el PC, no obstante las pérdidas en grano con deficiencias durante el llenado de grano variaron entre 3,5 y 4,5 t ha⁻¹ aproximadamente, implicando pérdidas porcentuales de 23 a 31 % en relación al T1.

El T5 presentó disminuciones de rendimiento en relación al T1 que variaron entre 0 y 8 t ha⁻¹ aproximadamente, en los tres temporadas evaluadas, implicando pérdidas de grano que variaron entre 0 y 52 %. Esta gran variabilidad en los rendimientos obtenidos en el tratamiento en seco, se justificó por el comportamiento de las PP que provocó contenidos hídricos del suelo diametralmente diferentes en las distintas etapas de desarrollo del maíz.

Componentes del rendimiento

Número de granos por metro cuadrado y peso promedio de grano

En la Figuras 7 y 8, se muestran los resultados obtenidos en el número de granos por superficie y el peso promedio de grano, respectivamente. Los tratamientos que lograron los mayores rendimientos presentaron el número de granos por superficie más elevado. El T1 y el T3 en las tres temporadas obtuvieron los rendimientos más altos y el mayor número de granos m⁻². Estos resultados, se explicaron debido a que en ambos tratamientos, durante el entorno de la floración (PC de determinación del rendimiento en maíz), no se presentaron deficiencias hídricas y en ésta etapa es en la que se determina el número de granos, por ese motivo en el T1 y en el T3 se obtuvo un alto número de granos. Los efectos de las deficiencias de agua en el PC, se basan en que la disponibilidad hídrica afecta la tasa de crecimiento del cultivo en esa etapa y la misma es determinante del estado fisiológico del cultivo y éste de la fijación del número de granos. Si no se logra un buen estado fisiológico del cultivo durante el PC, el número de granos fijados disminuye en relación al potencial y con ello el rendimiento es afectado negativamente.

En la temporada 3 se logró el mayor número de granos m⁻² logrando 6.100 y 5.700 granos m⁻² para el T1 y el T3, respectivamente. En la temporada 2 los mismos tratamientos presentaron 4.900 y 4.800 granos m⁻² y en la temporada 1 el número de granos fue de 4.500 y 4.200 para T1 y para el T3, respectivamente. El bajo número de granos relativo de la temporada 1 se debió a las condiciones climáticas anteriormente detalladas, las que afectaron la tasa de crecimiento del cultivo y el número de granos. En la temporada 3 la elevada luminosidad y radiación solar posibilitaron altas tasas de crecimiento del cultivo durante el PC. En la temporada 2 las condiciones climáticas durante el PC no fueron extremas, por lo tanto se presentó un comportamiento intermedio en el número de granos.

En el T2 hubo una disminución del número de granos en relación al T1 que varió entre 2.100 y 2.800 granos m⁻², esta

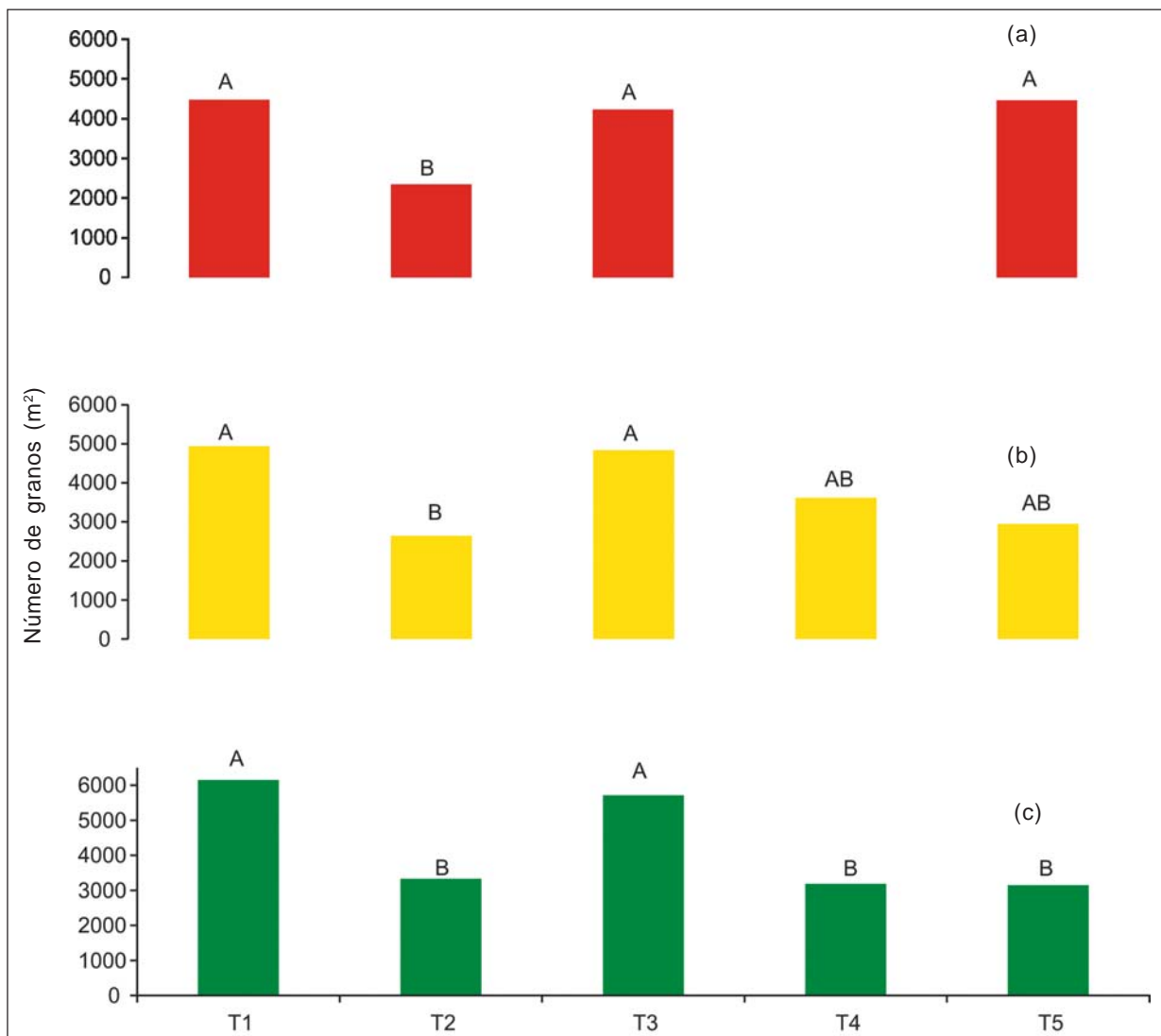


Figura 7. Número de granos por metro cuadrado de maíz en los tratamientos evaluados para las temporadas 2009-10 (a), 2010-11 (b) y 2011-12 (c).

reducción implicó entre 46 y 48 % de los granos. Se puede observar que las pérdidas de rendimiento del T2 fueron similares porcentualmente a la disminución del número de granos en relación al T1.

El T4 presentó un bajo número de granos por superficie, las pérdidas en granos variaron entre 2.000 y 3.000 granos m^{-2} aproximadamente, similares a las ocurridas en el T2, significando disminuciones de 40 a 48 % en relación al T1. En el tratamiento con deficiencias hídricas acumuladas en las etapas vegetativas y el PC, se determinó una baja fijación de granos por superficie que afectó significativamente el rendimiento.

El T5 presentó un comportamiento diferente en el número de granos por superficie, entre temporadas, en concordancia con el régimen de PP variable entre años. En la temporada 1 con elevadas PP el número de granos m^{-2} fue de 4.500 similar al obtenido en el T1. En cambio, en las temporadas 2 y 3 el número de granos m^{-2} varió aproximadamente entre 3.000 y 3.200. La tasa de crecimiento del cultivo durante el PC, en el caso del T5 varió directamente con la ocurrencia de PP, las cuales justifican la variabilidad obtenida, tanto en el número de granos por superficie como en el rendimiento.

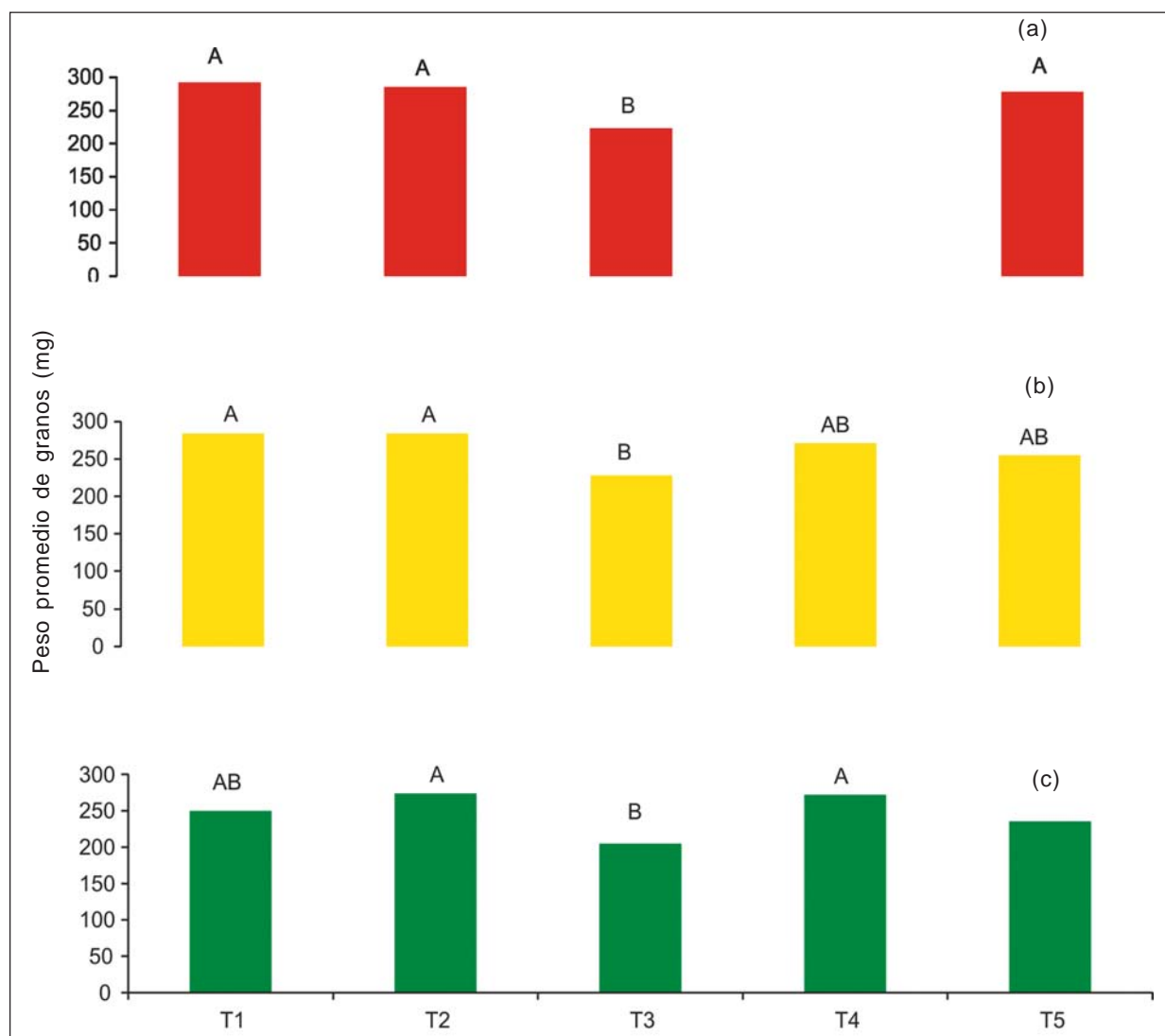


Figura 8. Peso promedio de granos (mg) en los tratamientos evaluados en las temporadas 2009-10 (a), 2010-11 (b) y 2011-12 (c).

En la etapa de llenado de granos se define el peso promedio del grano, que es un componente residual del rendimiento. Las deficiencias hídricas, en esta etapa, provocan disminuciones en la tasa de crecimiento del cultivo y como consecuencia el peso promedio del grano es afectado negativamente. El T3 en las tres temporadas del estudio presentó el menor peso de grano en los tratamientos evaluados. En cambio, en los T2 y T4 el peso de grano fue elevado dado que el número de granos fue bajo y la disponibilidad hídrica alta durante el llenado de grano, esto posibilitó un mayor crecimiento del cultivo en esta etapa.

De acuerdo a los resultados, se puede inferir que el rendimiento en maíz no se relaciona con el peso del grano, los T2 y los T4 presentaron un elevado peso de grano y un rendimiento bajo. Esto ocurre porque el componente principal del rendimiento es el número de granos m^{-2} . El T1 mostró pesos de granos elevados, excepto en la temporada 3, en que el número de granos fue muy alto y el peso de granos fue inferior incluso al obtenido en los T2 y T4, sin embargo el rendimiento logrado en el T1 fue el más elevado. La residualidad que presentó el peso promedio de grano fue notoria, en la medida que el número de granos fue elevado el peso

de grano fue bajo, debido a la escasez de fotoasimilados en la planta durante la etapa de llenado. En el T5 el peso promedio del grano fue variable de acuerdo a la ocurrencia de PP en la etapa de llenado de grano y al número de granos fijados.

Consumo de agua

En el Cuadro 5 se muestra el consumo total de agua para los diferentes tratamientos evaluados en las tres temporadas de estudio. Se destacó en el T1 la variabilidad en el consumo de agua. En la temporada 1, el consumo fue aproximadamente 140 mm menos que en las temporadas 2 y 3, esto se debió a que en el primer año experimental presentó mayores PP, un número elevado de días nublados, menor radiación solar incidente y como consecuencia una disminución en la demanda atmosférica y por consiguiente el consumo de agua total del cultivo fue menor.

En las temporadas 2 y 3 el consumo de agua del T1 fue similar y en el entorno de 600 mm, la demanda atmosférica fue más elevada que en la temporada 1 debido a la mayor radiación solar incidente, justificando de esa forma los consumos de agua mayores.

La etapa de desarrollo del ciclo en que el consumo de agua fue más elevado se ubicó en el entorno de la floración (PC), la misma posee una duración de 30 días aproximadamente y el consumo de agua fue de 38 a 40 % del total. Este alto consumo durante el PC, se debió a que el mismo ocurrió temporalmente durante los meses de mayor demanda atmosférica (diciembre y enero). Por lo tanto, el PC es una etapa cualitativamente impor-

tante en relación al AD para el cultivo y cuantitativamente significativa, en relación al consumo en el ciclo del maíz. El llenado de grano es la etapa que continúa al PC en consumo de agua, no obstante se ubicó temporalmente en meses con menor demanda atmosférica (febrero-marzo), pero la longitud de la etapa es la mayor en el ciclo y esto justifica el consumo.

Como se observa en el Cuadro 5, los tratamientos con deficiencias hídricas (T2, T3 y T4) presentaron menores consumos de agua y provocaron las disminuciones en el rendimiento analizadas anteriormente. El T5 presentó mayores consumos de agua en el año con PP más elevadas (temporada 1) y los consumos disminuyeron en las temporadas 2 y 3.

Soja

Rendimiento en grano

En la Figura 9 se muestran los resultados obtenidos en rendimiento de soja en los tratamientos evaluados, en las tres temporadas de estudio. El rendimiento en grano del T1 sin deficiencias hídricas, varió entre 4,9 y 7,3 t ha⁻¹ aproximadamente. Los rendimientos menores se obtuvieron en la temporada 1, al igual que en maíz debido a los excesos de PP y al elevado número de días nublados y a las consecuencias sobre la radiación solar incidente explicitadas anteriormente. Los rendimientos superiores se lograron en la temporada 2, en la que las PP durante el ciclo fueron las más bajas de las tres temporadas evaluadas.

La diferencia en el rendimiento de soja entre los T1 de la mejor y peor temporada

Cuadro 5. Consumo estimado de agua (mm) en maíz para los diferentes tratamientos, etapas de desarrollo y temporadas, evaluadas.

Etapa	Vegetativa			Entorno de floración			Llenado de grano			Ciclo			
	Año	2009	2010	2011	2009	2010	2011	2009	2010	2011	2009	2010	2011
Trat.													
T1	134	159	177	185	225	243	141	215	183	460	599	603	
T2	134	159	177	73	86	106	112	206	149	319	451	432	
T3	134	159	177	185	225	243	91	128	128	410	512	548	
T4	0	91	113	0	75	124	0	209	161	0	375	398	
T5	128	77	115	177	78	87	121	165	147	426	320	349	

fue de 33 % y en maíz esa misma diferencia alcanzó a 14 %. La soja es una especie de tipo fotosintético C3 y el maíz es C4, por lo tanto era esperable que los efectos negativos, ante la disminución de la radiación solar en la temporada 1 fueran mayores en el maíz que en la soja. La explicación encontrada fue que en soja en la temporada 1 además de los excesos hídricos por la ocurrencia de elevadas PP, se presentaron efectos negativos sobre el rendimiento debido a la fecha de siembra, la que se atrasó con respecto a la planificada debido a las continuas PP y fue sembrada a inicios del mes de diciembre. Por lo que en esa situación, se adicionaron a los efectos de las PP excesivas las consecuencias de una fecha de siembra tardía. Esto produjo menores temperaturas y radiación solar durante el PC, afectando significativamente el potencial de rendimiento en la temporada 1.

Además, se constataron diferencias en rendimiento en el T1 entre las temporadas 2 (7,3 t ha⁻¹) y 3 (6,2 t ha⁻¹), implicando diferencias de un 15 %. El número de PP y el volumen acumulado de las mismas durante el PC de la temporada 3, fue superior a la 2. El mes de febrero de la temporada 3 en la que se ubicó mayoritariamente el PC presentó PP superiores a 300 mm. Si bien el T5 fue favorecido por las PP, los tratamientos sin deficiencias hídricas en el PC, presentaron consecuencias negativas sobre la productividad.

El rendimiento de soja sin deficiencias hídricas fue de 5 a 7 t ha⁻¹ aproximadamente. La información científica en referencia a la respuesta de soja a condiciones hídricas ajustadas a los requerimientos del cultivo a la fecha es prácticamente inexistente.

Los mayores rendimientos en las tres temporadas evaluadas se lograron en las situaciones con elevada radiación solar y bajas PP durante el PC, habituales en los años «Niña» y los menores rendimientos se obtuvieron en condiciones de excesos de PP que ocurren principalmente en los años «Niño» y con siembras tardías de diciembre.

Las pérdidas de rendimiento por deficiencias hídricas durante el PC (T2) fueron de 2,5 a 3,2 t ha⁻¹ de grano aproximadamente, implicando reducciones de 44 a 50 % en relación al T1. Se destacó la susceptibilidad a las deficiencias hídricas de soja en el PC (R4 y R6) con disminuciones del rendimiento similares a las evaluadas en maíz.

En el caso del T3 en que las deficiencias se acumularon en la etapa vegetativa y la floración, las pérdidas de rendimiento en los años estudiados variaron entre 0,9 y 1,7 t ha⁻¹, implicando disminuciones entre 15 y 23 % del rendimiento logrado en el T1. Se constató que las deficiencias de agua en la etapa vegetativa no fueron de significación, la floración es una etapa de mayor susceptibilidad que la etapa vegetativa, sin embargo no es la etapa de mayor importancia en la determinación del rendimiento en grano de soja.

Las pérdidas de rendimiento del T4 variaron entre 2,4 y 2,5 t ha⁻¹ aproximadamente, implicando disminuciones de 32 a 40 % en relación al T1. Se comprobó que las disminuciones en el T2 fueron superiores a las producidas en el T4 con deficiencias en la etapa vegetativa y el PC. Este tipo de respuesta, se explicó por una menor competencia entre plantas durante el PC en el T4 en relación al T2, debido a un tamaño de plantas menor del T4 debido a que en este tratamiento las deficiencias hídricas comenzaron en la etapa vegetativa y continuaron durante el PC.

En el T5 las diferencias en rendimiento con el T1 variaron de 0 a 2,8 t ha⁻¹ aproximadamente, en los tres años de estudio, implicando pérdidas de rendimiento de 0 a 38 %. Es importante aclarar que en las tres temporadas durante los meses de febrero se presentaron PP importantes, y en este mes se ubicó mayoritariamente el PC, esta situación de buena disponibilidad hídrica en esta etapa justificó que las disminuciones en el rendimiento del T5 no fueran de significación, incluso en la temporada 1, como en los demás cultivos, se obtuvieron rendimientos similares al T1.

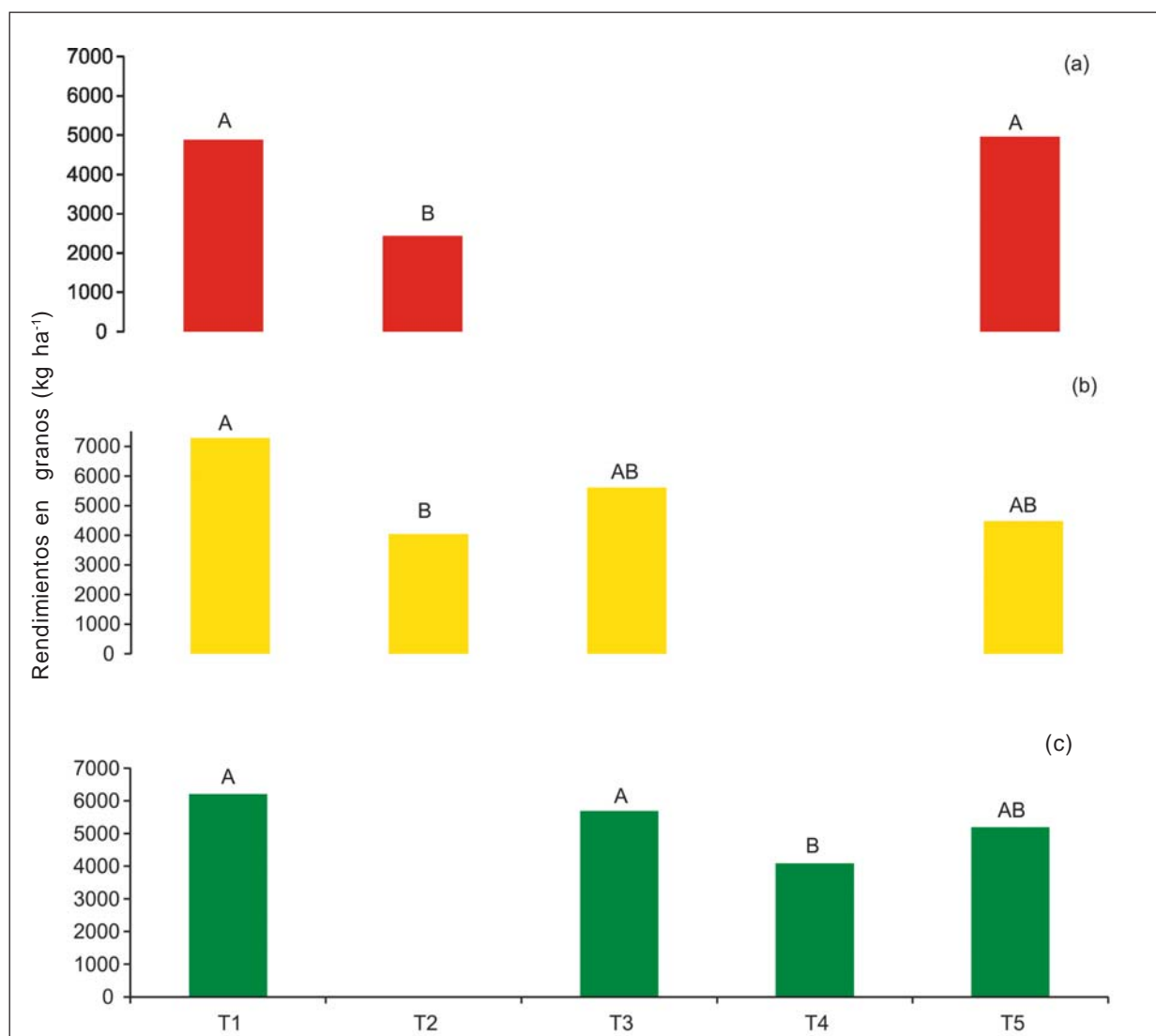


Figura 9. Rendimientos (kg ha⁻¹) en grano de soja en los tratamientos evaluados de las temporadas 2009-10 (a), 2010-11 (b) y 2011-12 (c).

Componentes del rendimiento

Número de granos por metro cuadrado y peso promedio de grano

En las Figuras 10 y 11 se muestran el número de granos por metro cuadrado y el peso promedio de grano respectivamente, en los diferentes tratamientos y años de estudio.

En la temporada 2 en el T1 se obtuvo el mayor número de granos m⁻² de las tres temporadas de evaluación. Asimismo, en este tratamiento el peso promedio de grano obtenido fue el menor, fue notoria la compensación que se presentó entre los dos componentes principales del rendimiento en el T1, a mayor número de

granos menor peso promedio de los mismos. Se constató en soja al igual que en maíz, la importancia decisiva del número de granos por superficie sobre el rendimiento y la jerarquía que posee la disponibilidad hídrica durante el PC en la definición de este componente.

En los T2 (temporadas 1 y 2) y en el T4 (temporada 3) con deficiencias hídricas durante el PC, fueron significativos los efectos negativos en la fijación del número de granos. En cambio, en los T3 (temporadas 2 y 3) con deficiencias acumuladas en la etapa vegetativa y en la floración, el número de granos por superficie fue elevado, no obstante se presentó una tendencia a presentar un menor nú-

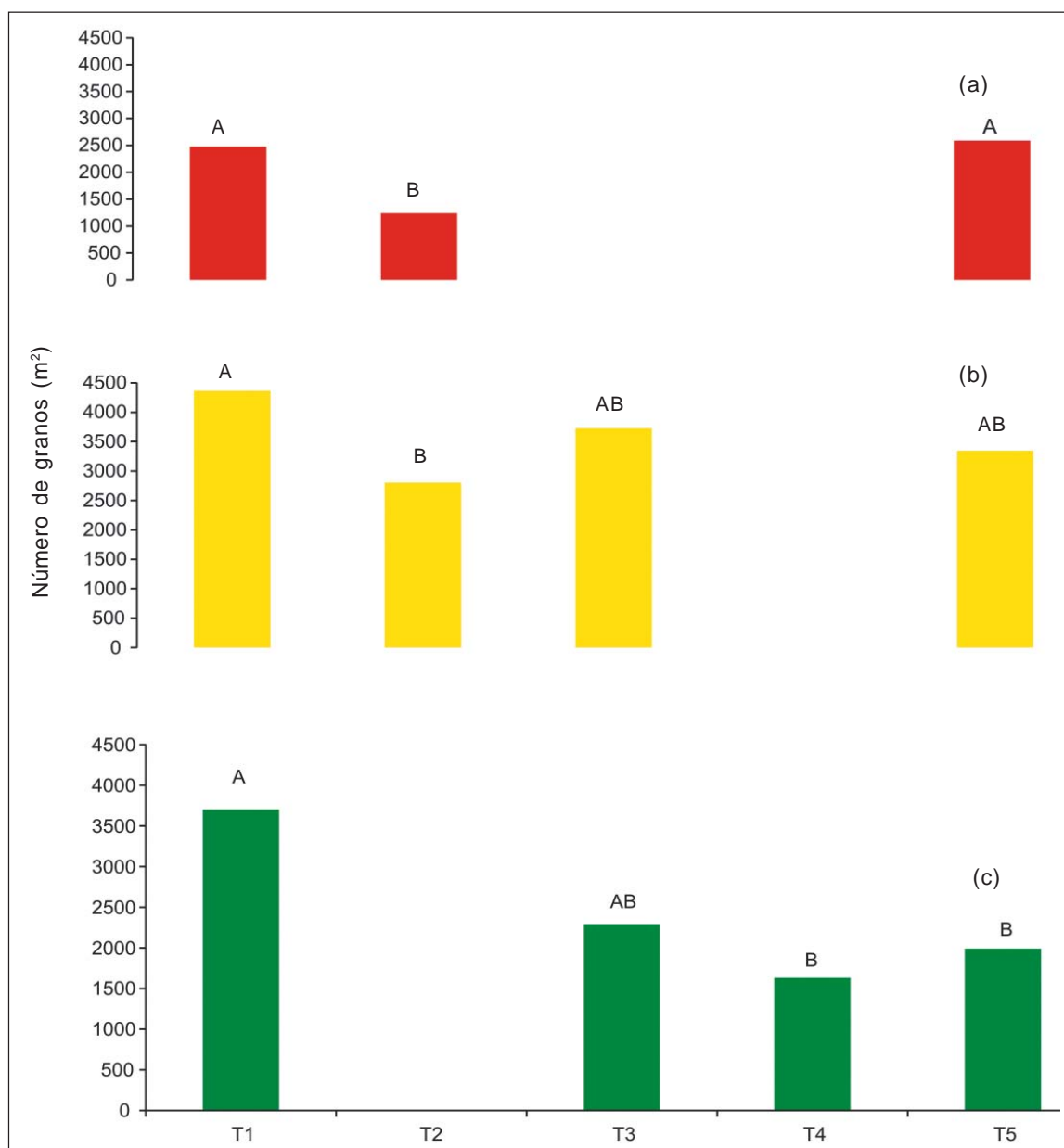


Figura 10. Número de granos (m^2) de soja en los tratamientos evaluados en las temporadas 2009-10 (a), 2010-11 (b) y 2011-12 (c).

mero de granos que los obtenidos en los T1, debido a que en los T3 fueron afectados con deficiencias hídricas en la etapa de floración. El número de granos en soja se determina definitivamente entre las etapas R4-R6, no obstante las deficiencias hídricas en floración provocan cierta afectación del número de granos.

En los T5 en las tres temporadas evaluadas el número de granos por superficie y el peso promedio de los mismos fue variable entre años y dependiente de la distribución y ocurrencia de PP.

Consumo de agua

En el Cuadro 6 se muestra el consumo de agua en soja en los diferentes tratamientos evaluados. El consumo en el T1 sin deficiencias hídricas, presentó variaciones entre años que oscilaron entre 80 y 100 mm, aproximadamente. En la temporada 1 con mayores PP el consumo total de agua fue menor que en las temporadas 2 y 3, debido a los argumentos detallados en maíz. Se debe considerar que el consumo total de agua en soja, varía significativamente con el GM utili-

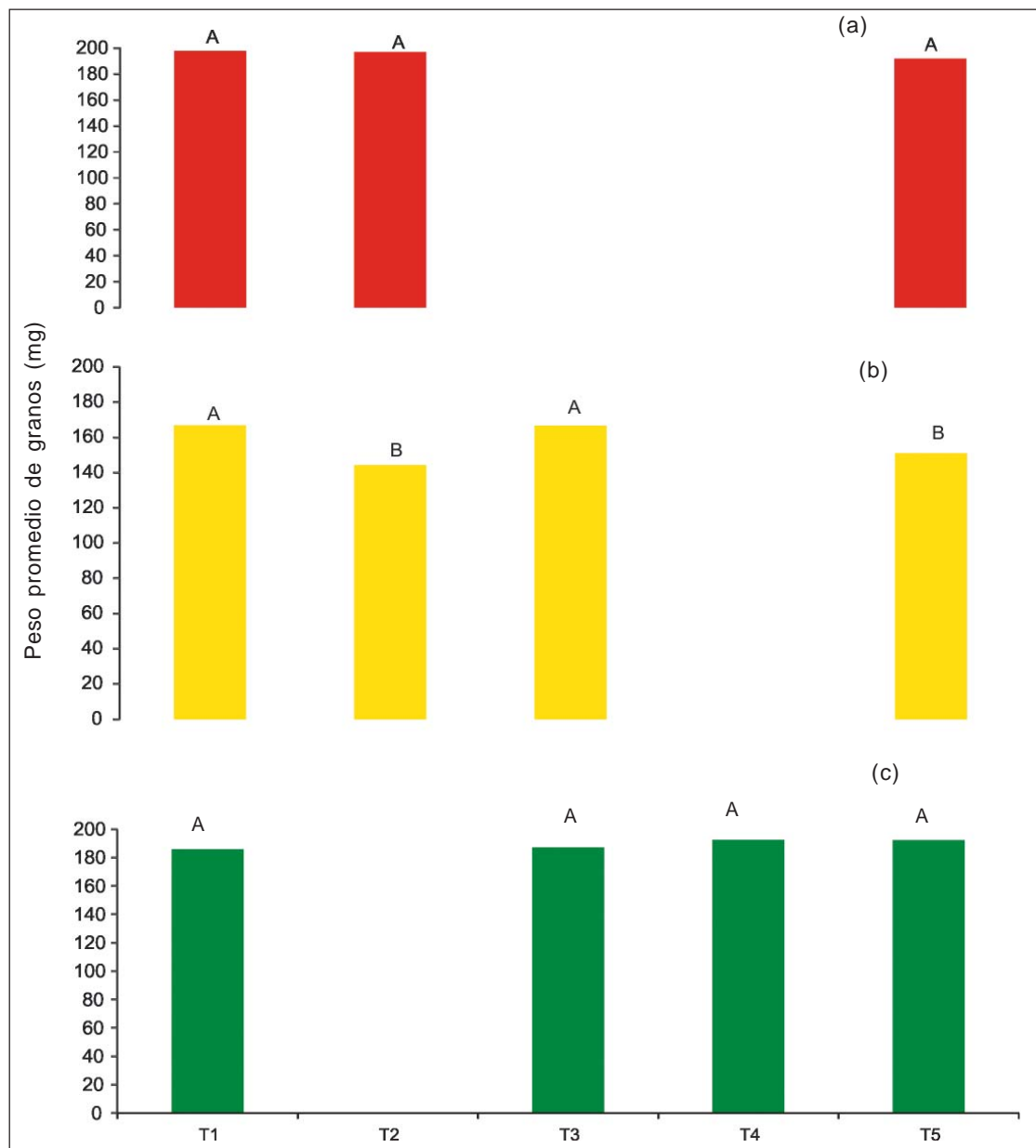


Figura 11. Peso promedio de grano (mg) de soja para los tratamientos evaluados en las temporadas 2009-10 (a), 2010-11 (b) y 2011-12 (c).

zudo, en el caso de este estudio la variedad fue del GM V corto con una duración de ciclo entre emergencia y madurez de 120 días aproximadamente. El T1 presentó consumos de agua que variaron entre 423 y 524 mm. El PC mostró una duración de 28 a 32 días y un consumo de agua en ese período que varió entre 30 y 38 % del consumo total en el ciclo. En comparación con maíz, el consumo en el PC de soja fue menor, y esto se basó en que la ubicación temporal del mismo fue principalmente durante el mes de febrero, dadas las fechas de

siembra y la variedad utilizada, y en este mes las demandas atmosféricas son menores a las que ocurren en los meses de diciembre y enero.

Al igual que en maíz, los tratamientos con deficiencias hídricas (T2, T3 y T4) presentaron menor consumo de agua que el T1 y este produjo disminuciones en el rendimiento y en los componentes analizadas anteriormente. Al igual que en maíz el T5 presentó mayores consumos de agua en la temporada 1 con PP más elevadas que en las temporadas 2 y 3.

Cuadro 6. Consumo estimado de agua (mm) en soja para los diferentes tratamientos, etapas de desarrollo y temporadas evaluadas.

Etapas	Vegetativa (VE-R1)			Floración (R1 +R2)			Inicio Fructificación (R3)			Período crítico (R4-R6)			Madurez (R7-R8)			Ciclo (VE-R8)		
	Año	2009	2010	2011	2009	2010	2011	2009	2010	2011	2009	2010	2011	2009	2010	2011	2009	2010
T1	68	71	82	105	97	117	43	92	81	149	150	165	64	94	79	429	504	524
T2	68	71	82	105	97	117	43	92	81	96	109	104	52	72	67	364	441	451
T3	0	67	57	0	49	60	0	79	53	0	150	153	0	94	79	0	439	402
T4	0	66	57	0	49	72	0	69	42	0	109	84	0	67	67	0	360	322
T5	68	67	41	94	50	51	43	65	25	134	105	99	59	67	68	398	354	284

Sorgo

Rendimiento en grano

En la Figura 12 se observan los rendimientos en grano de sorgo en los tratamientos evaluados. Los rendimientos del T1 fueron de 10,5 y 13,4 t ha⁻¹ para las temporadas 2 y 3, respectivamente. Las variaciones del rendimiento, entre años se explicaron por aspectos analizados anteriormente, que afectaron el ambiente de producción, independientemente de la disponibilidad hídrica. La temporada 3 se caracterizó por la presencia de escasas PP durante el PC y elevados valores de radiación solar y temperaturas. En cambio, en la temporada 2 ocurrieron PP abundantes del orden de 260 mm durante el PC, asimismo hubo un mayor número de días nublados y una disminución de la radiación solar incidente en esta etapa. El sorgo es una especie C4 con alta respuesta a la radiación solar. Por lo tanto, las condiciones climáticas de la temporada 3 generaron un ambiente de producción adecuado a los requerimientos del cultivo y con ello mayor fijación de biomasa y mejores condiciones ambientales para la transformación de la misma en grano.

El T2 disminuyó el rendimiento en relación al T1 entre 3,1 y 4,5 t ha⁻¹ y en los T4 las pérdidas de rendimiento fueron de 3,6 a 7,3 t ha⁻¹. El T4 presentó diferencias de rendimiento con el T2 en la temporada 3. Este comportamiento, se explicó debido a que la producción de biomasa durante la etapa vegetativa es de importancia decisiva en sorgo, debido a que la especie posee mecanismos morfo-fisiológicos que permiten tolerar las deficiencias hídricas mejor que el maíz en la etapa reproductiva. Las disminuciones provocadas en el rendimiento son menores en sorgo que en otros cultivos en la medida que la etapa vegetativa no presente deficiencias hídricas importantes y la fijación de biomasa no se vea afectada en forma significativa.

El rendimiento obtenido en el T5 varió entre 7,1 y 8,3 t ha⁻¹ y las disminuciones en relación al T1 fueron de 32 y 38 % para los dos años estudiados. Las pérdidas de rendimiento fueron de menor significación y variación que en maíz, ratificando la conocida tolerancia a las deficiencias hídricas del cultivo de sorgo. Por otra

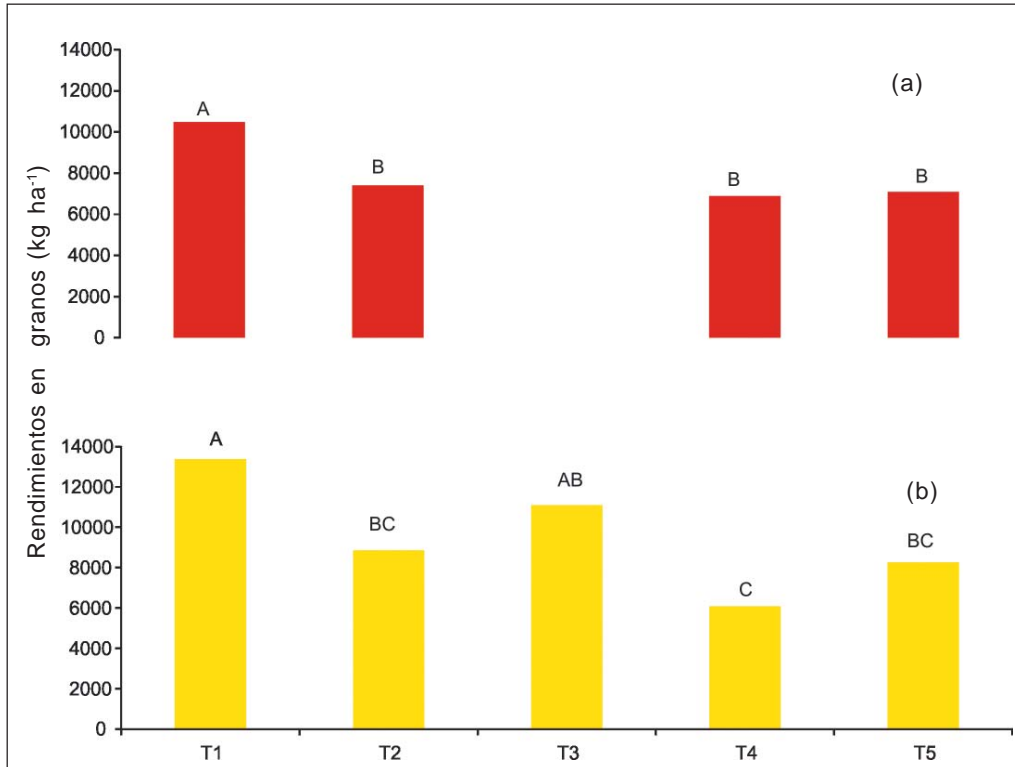


Figura 12. Rendimiento en grano de sorgo (kg ha^{-1}) en los tratamientos evaluados en las temporadas 2010-11 (a) y 2011-12 (b).

parte, se constató un elevado potencial de producción de grano en el T1 sin deficiencias hídricas.

La bibliografía nacional en referencia a la respuesta del sorgo a condiciones hídricas ajustadas a los requerimientos del cultivo es escasa se registran escasos ensayos con riego en este cultivo (Faccio *et al.*, 2002).

De acuerdo a la información obtenida se puede indicar que el rendimiento sin deficiencias hídricas de sorgo granífero se ubicó entre 11 y 13 t ha^{-1} aproximadamente y los mayores rendimientos se lograron en la temporada que presentó valores de radiación solar elevados principalmente en el entorno de la floración.

Si bien la cuantificación de las pérdidas de rendimiento en grano por causa de deficiencias hídricas en sorgo requiere mayor información, se puede deducir que los mecanismos morfo-fisiológicos de tolerancia a las deficiencias hídricas que posee la especie, provocan que las disminuciones del rendimiento por esta causa sean menores que en maíz y soja. Asimismo, se destacó la importancia que posee la disponibilidad hídrica en la

etapa vegetativa en la productividad del sorgo, a diferencia de lo que ocurrió en los cultivos de soja y maíz que es una etapa de menor significación en la determinación del rendimiento.

Componentes del rendimiento

Número de granos por metro cuadrado y peso promedio de grano

En las Figuras 13 y 14 se muestran los resultados obtenidos de los componentes principales del rendimiento en sorgo. Se confirma en sorgo las afirmaciones realizadas en maíz y soja sobre el número de granos m^{-2} . Este es el componente numérico principal del rendimiento y el peso de grano es también en sorgo un componente residual.

Los T1 con mayor rendimiento en grano fueron los tratamientos que presentaron el mayor número de granos por superficie. No se detectaron diferencias significativas para el peso de grano, entre tratamientos. Asimismo, el T4 con deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y el PC, la temporada 2 presentó un bajo número de granos y peso de grano, por

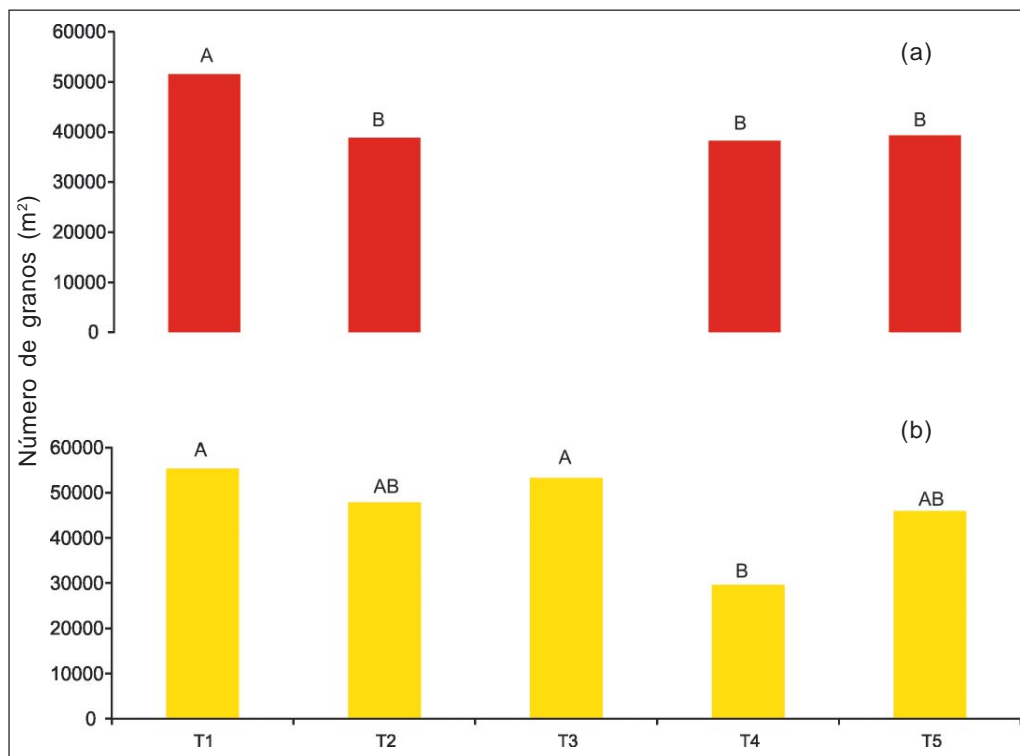


Figura 13. Número de granos por metro cuadrado de sorgo para los tratamientos evaluados en las temporadas 2010-1 (a) y 2011-12 (b).

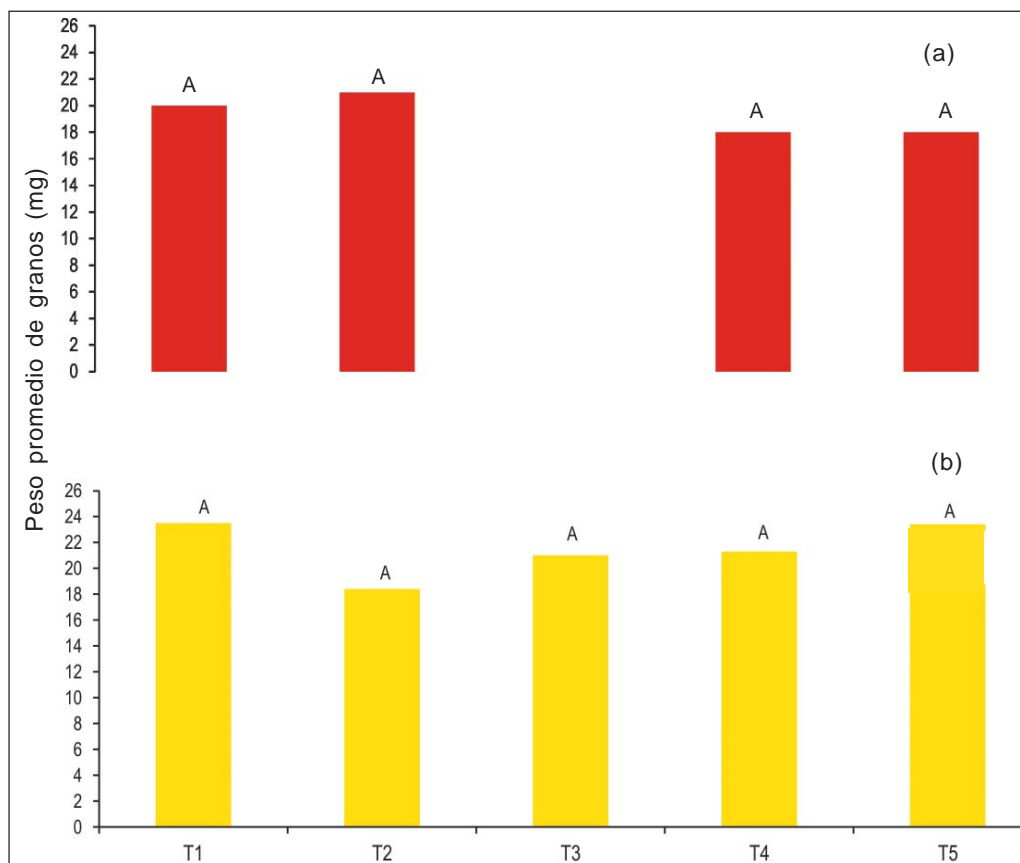


Figura 14. Peso promedio de grano (mg) de sorgo para los tratamientos evaluados en las temporadas 2010-11 (a) y 2011-12 (b).

Cuadro 7. Consumo estimado de agua (mm) en sorgo en los diferentes tratamientos, etapas de desarrollo y temporadas evaluadas.

Etapa	Vegetativa		Entorno de Floración		Llenado de grano		Ciclo		
	Año	2010	2011	2010	2011	2010	2011	2010	2011
T1		111	125	141	209	157	146	409	480
T2		111	125	85	86	157	100	353	311
T3		111	125	141	209	118	86	370	420
T4		80	77	99	70	157	100	336	247
T5		80	87	99	74	117	146	296	307

haber presentado deficiencias hídricas acumuladas en la etapa vegetativa y reproductiva. En la temporada 3 el número de granos fue bajo y el peso de grano fue levemente superior al año anterior, no obstante no hubo diferencias en peso promedio con los restantes tratamientos evaluados como se indicara anteriormente.

Consumo de agua

En el Cuadro 7 se muestra el consumo de agua total y por etapas de desarrollo de sorgo en los diferentes tratamientos. El sorgo fue el cultivo, entre los estudiados, que presentó menor consumo total de agua en el T1, el mismo varió entre 410 y 480 mm en las temporadas evaluadas. Cabe indicar que en estos años, no se presentaron condiciones climáticas extremas como las que ocurrieron en maíz y soja en la temporada 1 de evaluación. A su vez, el sorgo fue el cultivo que presentó menor duración de ciclo (96 a 109 días).

En el T1 durante el PC ubicado en el entorno de la floración se estimó un consumo de agua que varió entre 140 y 210 mm y que significó entre 35 y 44 % del consumo total. En la temporada 3, el consumo fue elevado durante el PC, en este año el PC fue la etapa de desarrollo de mayor consumo. En cambio en la temporada 2, el llenado de grano superó en consumo de agua al PC. Se verificó que las condiciones de demanda atmosférica fueron determinantes en definir la etapa de mayor consumo de agua en sorgo.

En maíz en los tres años de evaluación, el PC resultó la etapa de mayor consumo incluso con condiciones de gran variabilidad en las demandas atmosféricas entre temporadas. Esta diferencia

entre sorgo y maíz, se debió principalmente a la ubicación temporal de los PC. En maíz el PC se ubicó entre fines de diciembre y enero. En el caso de sorgo, esta etapa se ubicó entre fines de enero y febrero, generalmente esta ubicación temporal del PC en sorgo posee menor demanda atmosférica que la de maíz lo cual justifica el menor consumo.

El consumo total de agua en los tratamientos con deficiencias hídricas inducidas en diferentes etapas de desarrollo (T2, T3 y T4) fue inferior al ocurrido en el T1, provocando las disminuciones en el rendimiento analizadas anteriormente. En el caso del T5 el consumo fue similar en ambos años y de aproximadamente 300 mm, variando las etapas en las que se produjeron las deficiencias hídricas de acuerdo al régimen de PP.

CONCLUSIONES

Los rendimientos obtenidos en soja, maíz y sorgo, sin deficiencias hídricas fueron elevados en las tres temporadas evaluadas, se verificó la importancia decisiva que posee la disponibilidad hídrica en la determinación del rendimiento de los cultivos de verano, en las condiciones agro-climáticas del país. Sólo es posible superar esta limitante con la aplicación de riego suplementario debido a que las causas de las deficiencias hídricas son la baja capacidad de almacenamiento de agua de los suelos, el régimen variable de las PP y las elevadas demandas atmosféricas del verano. Y estos aspectos no son modificables en forma significativa por otras medidas de manejo.

La disminución del rendimiento en maíz, sorgo y soja, por deficiencias hídricas en distintas etapas de desarrollo fue

variable de acuerdo al cultivo y a la etapa del ciclo. Las deficiencias de agua inducidas en el PC fueron las que provocaron las mayores disminuciones de rendimiento en los tres cultivos. Sin embargo, en maíz y soja las pérdidas de rendimiento fueron cercanas a la mitad de la producción potencial de grano. En cambio, en sorgo las pérdidas fueron menores debido a la tolerancia que presenta la especie a condiciones de estrés hídrico.

Las deficiencias hídricas acumuladas en las etapas vegetativas y PC mostraron diferentes respuestas de acuerdo al cultivo. En maíz provocaron disminuciones del rendimiento levemente superiores a las que ocurrieron cuando las deficiencias fueron sólo en el PC. En soja las disminuciones del rendimiento con deficiencias acumuladas fueron inferiores a las ocurridas en el PC. En sorgo, las deficiencias hídricas acumuladas produjeron disminuciones del rendimiento similares a las ocurridas en maíz.

Los consumos de agua estimados en los cultivos sin deficiencias hídricas en todo el ciclo fueron mayores en maíz que en soja y sorgo. Se destacó en maíz el PC como la etapa de mayor consumo de agua debido a que la ubicación del mismo ocurre en los meses de mayor demanda atmosférica.

Los resultados obtenidos en relación a la disminución del rendimiento por deficiencias hídricas en las etapas de desarrollo de los cultivos de verano, permiten generar expectativas en estrategias eficientes del manejo del agua diferentes al riego suplementario durante todo el ciclo.

BIBLIOGRAFÍA

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M.** 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO. Irrigations and Drainage. Paper 56. Roma. 300 p.
- ALTAMIRANO, A.; DA SILVA, H.; DURÁN, A.; ECHEVERRÍA, A.; PANARIO, D.; PUENTES, R.** 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay, Tomo I: Clasificación de suelos. MAP. Dirección de Suelos y Fertilizantes. Montevideo.
- ANDRADE, F.H.; CIRILO, A.; UHART, S.; OTEGUI, M.** 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. Balcarce, Buenos Aires, La Barrosa. pp.82-239.
- BACCINO, G.; FORMOSO, F.** 2002. Inserción del riego por gravedad en los sistemas agropecuarios. Instituto Plan Agropecuario. MGAP Programa de Servicios Agropecuarios, INIA, IPA, PRENADER.
- FASSIO, A.; COZZOLINO, D.; IBAÑEZ, W.; FERNÁNDEZ, E.** 2002. Sorgo: destino forrajero. INIA «La Estanzuela». Serie Técnica N° 127.
- FERH, W.R.; CAVINESS, C.E.** 1977. Stages of soybean development. Iowa State University. Cooperative Extension Service. Special Report no. 80. pp. 929-931.
- FERERES, E.; SORIANO, M.A.** 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2): 147-159.
- GIMÉNEZ, L.** 2000. Efecto del riego sobre el rendimiento y calidad de algodón y maíz. In: Seminario investigación aplicada (2000, INIA Las Brujas). sp.
- GIMÉNEZ, A.; SAWCHIK, J.; ROMERO, R.; FORMOSO, F.** 2002. Sistema de Rotación INIA «La Estanzuela». GRASS. En: Baccino G. y F. Formoso. Inserción del riego por gravedad en los sistemas de producción agropecuaria. Instituto Plan Agropecuario. MGAP Programa de Servicios Agropecuarios, INIA, IPA, PRENADER.
- MGAP. DIEA.** 2013. Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Económicas Agropecuarias. Series Históricas. Agricultura. Cereales y Oleaginosos. (en línea). Montevideo. Consultado 20 de noviembre de 2013. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/portal/hgxpp001.aspx>.
- 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. 86 p.
- SAWCHIK, J.** 2012. Necesidad de riego en Cultivos y Pasturas. In: Seminario internacional (2°, 2012, Salto Uruguay). Riego en cultivos y pasturas. Montevideo Uruguay. 120 p.