

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**DEFICIENCIAS HÍDRICAS EN DISTINTAS ETAPAS
FENOLÓGICAS DE MAÍZ Y SOJA Y EVALUACIÓN DEL
MODELO AQUACROP**

por

Luis Angel Giménez Rodríguez

TESIS presentada como uno de los
requisitos para obtener el título de
Doctor en Ciencias Agrarias

Paysandú
URUGUAY
diciembre 2017

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Dr. Ing. Agr. Lineu Rodrigues, Ing. Agr. (PhD) Fernando Salvagiotti y Ing. Agr. (PhD) Santiago Dogliotti el 12 de diciembre de 2017. Autor: Ing. Agr. Luis Giménez. Director: Dr. Ing. Agr. José M^a Tarjuelo.

A mis hijos Manuel, Matías y Gerónimo. A mi madre que ya no está, pero que seguramente se hubiera sentido muy orgullosa de este logro. Y a mi compañera Lety. Para ellos que fueron, son y serán la parte más importante de mi vida les dedico este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

En principio agradezco a INIA por haber financiado los trabajos de campo y los equipos utilizados en los experimentos, a través de sus fondos concursables FPTA, el financiamiento permitió un cambio sustancial en la calidad de la investigación en riego de cultivos en la EEMAC. A la ANII por haberme otorgado una beca de doctorado nacional la cual allanó este largo camino.

Agradezco a mi tutor inicial el Dr. Ing. Agr. Mario García Petillo por el apoyo y el ánimo brindado para emprender el camino del doctorado, lamentablemente Mario ya no está y se extraña enormemente, a mi tutor actual el Dr. Ing. Agr. José M^a Tarjuelo catedrático de la Universidad de Castilla La Mancha-España, por haber asumido la responsabilidad de continuar con la dirección de la tesis, por su enorme calidad humana y su gran apoyo.

Al funcionario del campo experimental de la EEMAC Sr. Richard Arévalo que sin su colaboración hubiera sido imposible sostener el trabajo de campo realizado durante los cuatro años. A los estudiantes de tesis de grado y posgrado en riego de maíz y soja desarrolladas entre 2009 y 2012, actuales colegas Juan Pablo Grasso, Agustín Montero, Joaquín Grasso, Gastón Canosa, Claudio Prieto y Walter Callero, por su trabajo responsable en los experimentos. Agradezco a la Dra. Paula Paredes y al Dr. Luis Santos Pereira de la Universidad de Lisboa-Portugal, por los aportes en las publicaciones internacionales realizadas con la información proveniente de los experimentos.

A Fernanda y a mis hijos especialmente a Matías y Gerónimo, quienes ayudaron y bancaron muchas veces los trabajos de campo, principalmente en los veranos lluviosos y en las fiestas de fin de año, siempre estuvieron apoyando cuando las cosas no salían del todo bien. Y a Lety que me acompañó en la última etapa en las peripecias de gabinete, en la idas y vueltas con el modelo, en las alegrías y las amarguras, siempre estuvo como hasta ahora, con su buen humor y su voz de aliento.

TABLA DE CONTENIDO

	página
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN	IX
SUMMARY	X
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1. HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	7
1.2. OBJETIVO GENERAL.....	7
1.2.1. <u>Objetivos específicos</u>	7
1.3. MARCO TEÓRICO.....	9
1.3.1. <u>Determinación del rendimiento en maíz y soja</u>	9
1.3.2. <u>Deficiencias hídricas en cultivos</u>	13
1.3.2.1. Deficiencias hídricas en maíz.....	18
1.3.2.2. Deficiencias hídricas en soja.....	25
1.3.3. <u>Riego suplementario</u>	29
1.3.3.1. Riego suplementario en maíz.....	31
1.3.3.2. Riego suplementario en soja.....	33
1.3.4. <u>Riego deficitario</u>	35
1.3.4.1. Riego deficitario en maíz.....	37
1.3.4.2. Riego deficitario en soja.....	41
1.3.5. <u>Balance hídrico de suelos</u>	42
1.3.6. <u>Modelo de simulación Aquacrop de FAO</u>	43
1.3.6.1. Marco conceptual	44
1.3.6.2. Estructura y componentes.....	44
2. <u>PRODUCCIÓN DE MAÍZ CON ESTRÉS HÍDRICO PROVOCADO EN</u>	
<u>DIFERENTES ETAPAS DE DESARROLLO</u>... ..	51
2.1. RESUMEN	51
2.2. SUMMARY	52
2.3. INTRODUCCIÓN.....	52

2.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	54
2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	59
2.5.1. <u>Evolución del agua en el suelo</u>	59
2.5.2. <u>Consumo estimado de agua</u>	60
2.5.3. <u>Producción de biomasa</u>	63
2.5.4. <u>Rendimiento en grano y componentes</u>	65
2.6. CONCLUSIONES.....	68
2.7. BIBLIOGRAFÍA	68
 3. <u>EFFECTO DE LAS DEFICIENCIAS HÍDRICAS EN DIFERENTES</u> <u>ETAPAS DE DESARROLLO SOBRE EL RENDIMIENTO DE SOJA</u>	 71
3.1. RESUMEN	71
3.2. SUMMARY	72
3.3. INTRODUCCIÓN.....	72
3.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	73
3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	78
3.5.1. <u>Evolución del agua disponible en el suelo</u>	78
3.5.2. <u>Consumo estimado de agua</u>	80
3.5.3. <u>Producción de biomasa</u>	81
3.5.4. <u>Rendimiento en grano</u>	83
3.5.5. <u>Número de granos por superficie</u>	86
3.6. CONCLUSIONES.....	89
3.7. BIBLIOGRAFÍA	90
 4. <u>RESPUESTA DEL MAÍZ Y LA SOJA A DIFERENTES</u> <u>DISPONIBILIDADES HÍDRICAS EN DISTINTAS ETAPAS DE</u> <u>DESARROLLO</u>	 94
4.1. RESUMEN	94
4.2. SUMMARY	95
4.3. INTRODUCCIÓN.....	95
4.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	97

4.5. RESULTADOS DISCUSIÓN.....	105
4.5.1. <u>Maíz</u>	105
4.5.2. <u>Soja</u>	111
4.6. CONCLUSIONES.....	115
4.7. BIBLIOGRAFÍA	116
 5. <u>EVALUACIÓN DEL MODELO AQUACROP EN MAÍZ EN EL OESTE DEL URUGUAY CON DIFERENTES DISPONIBILIDADES HÍDRICAS</u> ..	119
5.1. RESUMEN.....	119
5.2. SUMMARY.....	120
5.3. INTRODUCCIÓN.....	121
5.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	122
5.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	129
5.5.1. <u>Calibración de Aquacrop</u>	129
5.5.2. <u>Validación de Aquacrop</u>	134
5.6. CONCLUSIONES.....	142
5.7. BIBLIOGRAFÍA.....	143
 6. <u>WATER USE AND YIELD OF SOYBEAN UNDER VARIOUS IRRIGATION REGIMES AND HEAVY WATER STRESS. APPLICATION OF AQUACROP AND SIMDUAL K_c MODELS</u>	146
6.1. ABSTRACT.....	146
6.2. INTRODUCTION.....	147
6.3. MATERIALS AND METHODS.....	149
6.3.1. <u>Site characterization description of the experiments</u>	149
6.3.2. <u>Modelling</u>	151
6.4. RESULTS AND DISCUSSION.....	155
6.4.1. <u>Soil water simulation and models calibration and parameterization</u>	155
6.4.2. <u>Water balance and water use components</u>	158
6.4.3. <u>Biomass and yield predictions</u>	163

6.5. CONCLUSIONS.....	166
6.6. REFERENCES.....	168
6.7. APPENDIX A.....	175
7. <u>RESULTADOS PRINCIPALES Y DISCUSIÓN</u>	177
7.1. MAÍZ.....	177
7.1.1. <u>Rendimiento</u>	179
7.1.2. <u>Componentes del rendimiento</u>	182
7.1.3. <u>Producción de biomasa e índice de cosecha</u>	184
7.2. SOJA.....	187
7.2.1. <u>Rendimiento</u>	188
7.2.2. <u>Componentes del rendimiento</u>	192
7.3. CONSUMO DE AGUA.....	196
7.3.1. <u>Maíz</u>	196
7.3.1.1 Evapotranspiración total	196
7.3.1.2. Riego.....	198
7.3.1.3. Productividad del riego	199
7.3.2. <u>Soja</u>	200
7.3.2.1. Evapotranspiración total	200
7.3.2.2. Riego.....	202
7.3.2.3. Productividad del riego	202
8. <u>CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS</u>	204
9. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	210
10. <u>ANEXOS</u>	229

RESUMEN

El sector agrícola de Uruguay presentó en los últimos años, cambios sin precedentes. Entre las transformaciones se destaca el incremento en la producción de granos de verano, particularmente soja. El crecimiento en la producción se basó en el incremento en la superficie sembrada, ya que los rendimientos de los cultivos de verano no han variado, son relativamente bajos y variables. La principal limitante ambiental del maíz y la soja realizados en secano es la disponibilidad hídrica, dada la variabilidad interanual de las precipitaciones (PP), que no cubren los requerimientos, provocando deficiencias hídricas en cualquier etapa del ciclo. El riego permite satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos, sin embargo, la adopción de esta tecnología en maíz y soja, hasta el presente, es escasa. Este trabajo determinó durante cuatro temporadas, los rendimientos de ambos cultivos en situaciones de bienestar hídrico y cuantificar las pérdidas de grano por causa de deficiencias hídricas en diferentes etapas del ciclo. Además, se evaluó el modelo Aquacrop de FAO que simula los rendimientos y la biomasa total con diferentes disponibilidades hídricas. La metodología experimental aplicada en los ensayos tuvo como objetivo controlar el agua disponible en las diferentes etapas de los ciclos de desarrollo de maíz y soja, a través de la aplicación de riego en las etapas con bienestar y la interceptación de las PP en las etapas con deficiencias hídricas. Los rendimientos medios logrados con bienestar hídrico fueron $14.400 \text{ kg ha}^{-1}$ en maíz y 6000 kg ha^{-1} en soja, aproximadamente. Las mayores pérdidas de rendimiento se constataron con las deficiencias ubicadas en el periodo crítico (PC) y fueron de 43% en maíz y 35% en soja. Las deficiencias en etapas no críticas provocaron disminuciones de 25% en maíz y 15% en soja y las deficiencias hídricas acumuladas en la etapa vegetativa y el PC, no aportaron mayores pérdidas de rendimiento que las constatadas sólo en el PC. El modelo Aquacrop estimó ajustadamente el rendimiento y la biomasa de maíz y soja en situaciones de disponibilidad hídrica favorables y las simulaciones con deficiencias hídricas severas presentaron errores.

Palabra claves: agua, riego, cultivos, simulación, déficit hídrico

CORN AND SOYBEAN WATER DEFICIT AT DIFFERENT PHENOLOGICAL STAGES AND AQUACROP MODEL EVALUATION

SUMMARY

The agricultural sector in the country has presented unprecedented changes in the last years; among the transformations, it outlines the growth in the production of summer grains, particularly soybean. The growth in grain production was based in the increase of the sown area, since yields have not changed being low and variable. The main environmental limitation of corn and soybean in drought is water availability, given the inter-annual variability of precipitations (PP) that do not cover the requirements, generating water deficiencies in any stage of the cycle. This work pretended to determine, during four seasons, soybean and corn yields in water welfare situations and to quantify grain losses caused by water deficit at different stages of the cycles. Additionally, FAO's Aquacrop model, which simulates crop yields with different water availabilities, was evaluated. The experimental methodology applied in the field trials was aimed to control the water available at different stages of crop and soybean cycles, through the application of irrigation in water welfare stages and PP interception in water deficit stages. The medium yields achieved in water welfare conditions were 14.400 kg ha⁻¹ for corn and 6000 kg ha⁻¹ for soybean. The major yield losses were noted with water deficiencies situated within the critical period (PC), these were 43% for corn and 35% for soybean. Water deficiencies during non-critical periods provoked yield drops of 25% in corn and 15% in soybean and deficiencies accumulated during vegetative period and PC did not cause greater losses than the ones observed for deficiencies only in the PC. The Aquacrop model estimated accurately corn and soybean biomass and yield in situations of favorable water availability, whereas simulations were poor in conditions of severe water deficiencies.

Keywords: water, irrigation, crops, simulation, hidric deficit.

1. **INTRODUCCIÓN**

Las proyecciones de crecimiento de la población mundial que desarrolló la FAO hacia 2050 indican que se llegaría a 9100 millones de habitantes. Para alimentar a dicha población sería necesario aumentar la producción de alimentos en un 70%, la producción anual de cereales, tendría que incrementarse en casi mil millones de toneladas. A su vez el 70% de este incremento dependerá de los países en desarrollo, los cuales deberían casi duplicar la producción actual y América Latina deberá jugar un rol preponderante en este necesario incremento en la producción de alimentos (FAO, 2009).

Asimismo, se prevé que el 90% del aumento de la producción a nivel mundial será debido a la intensificación productiva y al incremento de los rendimientos y sólo el 10% corresponderá al aumento del área de cultivos. Un factor clave para aumentar los rendimientos es la utilización de riego. Por ese motivo, se estima que la infraestructura de riego a nivel mundial aumentaría en un 11% y las tierras regadas se incrementarían en un 17% y este incremento se produciría principalmente en los países en desarrollo. La situación de la disponibilidad de los recursos de agua dulce a nivel mundial es suficiente, pero está desigualmente distribuida, y cada vez hay más países o regiones en que la escasez del agua alcanza niveles alarmantes (FAO, 2009).

La agricultura es el mayor usuario de agua dulce a nivel mundial aproximadamente el 70% de las extracciones de agua poseen este objetivo (Wallace, 2000; Howell et al, 2004), la industria utiliza el 20% y el uso doméstico el 10% aproximadamente (WWAP, 2009). La tasa de expansión de tierras irrigadas es el factor más importante y determinante de presión sobre el agua, al menos la relacionada con la cantidad.

En Uruguay las estimaciones más recientes de uso consuntivo del agua indican que el riego utiliza el 81% del agua mayoritariamente en arroz, el uso doméstico el 11%, la ganadería el 6% y la industria el 2% (FAO-AQUASTAT, 2015).

A diferencia de lo que ocurre en diversos países y regiones del mundo en las que el agua para riego es cada vez más escasa, en Uruguay hay grandes posibilidades

de incrementar el área de cultivos bajo riego. La superficie potencial de riego en el país se estima en 1.760.000 ha. (FAO-AQUASTAT, 2015). El área efectivamente regada actualmente no llega al 15% del potencial. El crecimiento de la demanda de agua para riego entre los años 1970 y 2000 se vinculó fundamentalmente al crecimiento del sector arrocero. Sin embargo, a partir del año 2000 el área de arroz disminuyó levemente, por lo que el aumento de riego en otros cultivos como maíz y soja cobró mayor relevancia, no obstante, el área regada de estos cultivos es mínima en relación a la superficie realizada en secano (MGAP-DIEA, 2016).

En la última década, el sector agrícola del país ha presentado cambios sin precedentes, entre las transformaciones más importantes se destaca el incremento en la producción de granos debido a un aumento continuo de la superficie de siembra de cultivos de verano que evolucionó de 157.000 ha en el año 2000 a 1.309.000 ha en 2015 (MGAP-DIEA, 2016). A partir de 2001, ocurre un aumento constante del área sembrada de soja, que fue acompañado por incrementos menores en las superficies de maíz y de sorgo. Estos cambios, transformaron la tendencia histórica de una agricultura principalmente invernal y de consumo nacional, en una actividad con predominio de cultivos estivales realizados en secano y de principal importancia en las exportaciones del país. El grano de soja se transformó en el principal producto exportado en 2014 desplazando del primer lugar a la carne vacuna congelada, que fue por décadas el mayor producto de exportación (Uruguay Siglo XXI, 2015).

El crecimiento de la producción de granos de verano se basó principalmente en el incremento de la superficie de siembra, ya que los rendimientos en los últimos 12 años no han variado en forma significativa. Sin embargo, en la producción comercial se han introducido cambios tecnológicos significativos en los cultivos de verano como: la adopción masiva de la siembra directa, la utilización de organismos genéticamente modificados en la totalidad de la superficie de soja y en la mayor parte del área de maíz, el control integrado de plagas, malezas y enfermedades y el aumento de la fertilización (García, 2011). La prevalencia de los cultivos de verano en relación a los de invierno, transformó radicalmente los principales problemas que presenta actualmente la agricultura del país.

Las limitantes al consumo de agua son el principal factor en provocar pérdidas en la biomasa depositada y en los rendimientos de los cultivos de verano realizados en secano (Sawchik y Ceretta 2005, Purcell et al. 2003, Andrade y Sadras, 2000, Boyer 1982). La magnitud de las pérdidas en rendimiento en grano depende de la intensidad, la duración y el tiempo en que ocurren las deficiencias hídricas (Andriani et al., 1991). Cuando la disponibilidad de agua no se adecua a los requerimientos, en las diferentes etapas de desarrollo de los cultivos estivales disminuye el potencial productivo.

La demanda atmosférica es inherente a cada ambiente, la principal fuerza motriz de la demanda es la cantidad de radiación solar que alcanza la superficie terrestre, fuente de la energía necesaria para promover el cambio de estado del agua de líquido a gaseoso. En condiciones de buena disponibilidad hídrica el consumo de agua por los cultivos está relacionado con la cobertura y ésta con la producción de biomasa (Otegui, 2009).

En los cultivos de verano realizados en secano, la variabilidad en la disponibilidad hídrica es 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 de los cultivos es aquel que se obtiene en ausencia de estrés, en estas condiciones el rendimiento que depende de la capacidad de fijar carbono a través de la fotosíntesis, estará regulado por la cantidad de radiación que el cultivo sea capaz de interceptar (Otegui, 2009).

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 modificables como el manejo de los cultivos. La información nacional sobre rendimientos potenciales en cultivos de verano es escasa, ya que la investigación se ha realizado mayoritariamente en condiciones de secano. El conocimiento de los rendimientos potenciales posee un valor relevante para desarrollar cultivos con riego, ya que es el punto de referencia para conocer las brechas de rendimiento entre diferentes manejos de los cultivos y del riego

Ante la falta de agua suficiente durante el ciclo de los cultivos, entre las estrategias que se utilizan, en general, para disminuir los efectos de las deficiencias hídricas en

agricultura en condiciones de secano, se encuentra la adecuación de los ciclos a los cambios temporales en la disponibilidad hídrica, especialmente en la ubicación de los periodos críticos (PC) para la determinación del rendimiento, fuera de los momentos de mayor estrés hídrico (Otegui, 2009).

En el país, la gran variabilidad de las PP provoca que no sea posible conocer, previo a la siembra, la ubicación temporal de las deficiencias hídricas. Por ese motivo, la estrategia de escape apunta a no ubicar el PC en las épocas de mayores demandas. En ese sentido, en maíz se han utilizado siembras tempranas del mes de setiembre con lo cual se logró que el PC no ocurra mayoritariamente en el mes de enero, o sea el mes de mayores demandas atmosféricas. Esta estrategia permite generalmente menores demandas durante el PC que en las fechas de siembras óptimas del mes de octubre.

Otra posibilidad de escape con la fecha de siembra es la utilización de siembras tardías en diciembre, ubicando las etapas vegetativas en situaciones de máxima demanda y los PC más tarde (Otegui, 2009). En maíz las temperaturas afectan a la longitud del ciclo, acortando los mismos. Además, en las siembras tardías, los PC ocurren con menores temperaturas medias e inferiores valores de radiación solar que en las siembras tempranas, provocando disminuciones en los rendimientos potenciales, y a su vez no se asegura en el PC la disponibilidad hídrica suficiente, la cual depende igualmente de la ocurrencia de PP.

Otras alternativas de manejo ante las deficiencias hídricas se basan en el ahorro de agua a través de la disminución de las pérdidas desde el suelo, y a su vez la captación del mayor volumen de agua de escorrentía. Esto es posible con la utilización de la siembra directa como método de preparación de suelos, en conjunto con el mantenimiento de volúmenes considerables de rastrojos y períodos más o menos largos de barbechos libres de malezas que permitan almacenar agua en el suelo (Ernst, et. al., 2009).

La escasa capacidad de almacenamiento de agua de los suelos hace que la utilización de la siembra directa, el manejo correcto de los rastrojos y los barbechos más o menos extensos, puedan presentar efectos positivos en el contenido hídrico del suelo sólo durante las primeras etapas de los cultivos, en las que se ubican las etapas vegetativas. Los PC de determinación de los rendimientos se encuentran en las etapas

reproductivas posteriores, por lo cual no son afectados significativamente por dichos manejos.

El riego suplementario es la tecnología que permite levantar la limitante ambiental de mayor jerarquía en la producción de cultivos de verano realizados en secano, permite incrementar la disponibilidad hídrica en las etapas del ciclo en que la misma es deficitaria, debido a que las demandas atmosféricas superan a la oferta de agua almacenada en el suelo. En consecuencia, el riego provoca incrementos y mejoras en la estabilidad de la producción de biomasa y en el rendimiento de los cultivos. A nivel comercial el riego suplementario de cultivos, hasta el presente, es escasamente utilizado por diferentes motivos, entre los que se destacan los costos directos elevados de esta tecnología. No obstante, los rendimientos en grano obtenidos en maíz y soja realizados en secano poseen una baja estabilidad debido a la elevada variabilidad de las PP, y son netamente inferiores a los rendimientos logrados en condiciones de riego.

Sin embargo, resulta necesario cuantificar el potencial productivo de maíz y soja, en ausencia de deficiencias hídricas y determinar las pérdidas en rendimiento que se producen por falta de agua en las diferentes etapas de desarrollo. Esta información permitirá aportar elementos para la toma de decisiones acerca de incrementar el riego en cultivos y a su vez estudiar las posibilidades de ajustar el riego en los diferentes sistemas de producción.

Asimismo, es importante conocer las funciones de producción de los cultivos con el agua. Se requiere generar conocimientos sobre los posibles manejos del riego, dadas las diferencias en el potencial de producción de los cultivos y los costos del riego mencionados anteriormente. Avanzar en el conocimiento de estos aspectos permitirá realizar evaluaciones sólidas de la incorporación de riego suplementario en maíz y soja, para distintas situaciones económicas y productivas.

El conocimiento del balance hídrico de suelos en la zona explorada por las raíces es fundamental para una buena gestión del agua de riego. En la conducción de riego tecnificado se debe responder a cuando y cuanto regar, y la respuesta dependerá del grado de conocimiento de los procesos de transferencia hídrica en la zona de enraizamiento entre el cultivo, el suelo y la atmósfera (Pereira et al., 2010).

Mejorar el manejo del riego y principalmente la eficiencia del uso del agua (EUA), en situaciones en los que esta tecnología posee costos directos elevados, es un aspecto primordial para incrementar la adopción de la misma por los productores agrícolas. En climas húmedos con PP mayores de 1300 mm al año como las del país y que además presentan elevada variabilidad interanual, las estrategias de riego suplementario deben adaptarse al balance hídrico. A su vez, el riego deficitario controlado (RDC) es una opción para mejorar la EUA, no obstante, requiere conocimientos precisos de la respuesta de los cultivos a diferentes situaciones de estrés hídrico. El conocimiento de la respuesta productiva de los cultivos a diferentes disponibilidades hídricas, en las distintas etapas de desarrollo, es un aspecto principal para definir estrategias de la planificación del riego bajo las condiciones agroecológicas y económicas del país.

Por otra parte, los modelos de simulación de crecimiento de cultivos que hacen foco en el agua, cuando están adecuadamente calibrados en cada región son herramientas que permiten evaluar diferentes estrategias de manejo del riego. El modelo Aquacrop-FAO (Steduto et al., 2009) es propuesto como un modelo para simular la producción de biomasa y rendimiento de cultivos, en diferentes escenarios de disponibilidad hídrica, incluso en secano y puede ser utilizado en un gran número de cultivos. El modelo considera los procesos fisiológicos de los cultivos y utiliza un número relativamente pequeño de parámetros. El Aquacrop en este sentido se puede considerar adecuado para su aplicación, no sólo a nivel de investigación, sino que es una herramienta posible de utilizar en la producción comercial.

En Uruguay, el modelo no ha sido evaluado, por otra parte, las calibraciones iniciales de esta herramienta de simulación en soja se han realizado en regiones muy diferentes agroecológicamente al cono sur de América Latina, donde actualmente existe la mayor concentración de área y producción de soja a nivel mundial y la disponibilidad hídrica es el principal factor en afectar los rendimientos.

1.1. HIPÓTESIS DE TRABAJO

Las deficiencias hídricas en el periodo crítico (PC) de determinación del rendimiento de soja y maíz, provocan pérdidas significativas en la productividad, superiores al 25% del rendimiento potencial, valor promedio estimado que permite cubrir los costos totales del riego. En cambio, cuando las deficiencias de agua ocurren en las etapas no críticas para la determinación del rendimiento, la disminución en la productividad de ambos cultivos es escasa e inferior al 25% del rendimiento potencial.

1.2. OBJETIVO GENERAL

Determinar las pérdidas de rendimiento provocadas por deficiencias hídricas en diferentes etapas del desarrollo de maíz y soja y, a su vez, cuantificar el rendimiento de ambos cultivos con bienestar hídrico durante todo el ciclo. Asimismo, se plantea evaluar un modelo de simulación que colabore en la toma de decisiones de manejo del riego en maíz y soja.

1.2.1 Objetivos específicos

- 1) Evaluar el rendimiento, la biomasa y los componentes del rendimiento de maíz y soja, en situaciones de bienestar hídrico en todo el ciclo.
- 2) Cuantificar los efectos sobre el rendimiento, la biomasa y los componentes del rendimiento por deficiencias hídricas provocadas en el entorno de la floración de maíz y en el llenado de grano de soja (PC de determinación del rendimiento).
- 3) Cuantificar los efectos sobre el rendimiento, la biomasa y los componentes del rendimiento por deficiencias hídricas provocadas en el llenado de granos de maíz y entre la etapa vegetativa y R3 (Fehr y Caviness, 1977) en soja (etapas del ciclo no críticas).
- 4) Cuantificar los efectos sobre el rendimiento, la biomasa y los componentes del rendimiento por deficiencias hídricas provocadas en la etapa vegetativa y el PC de maíz y soja.
- 5) Estimar el consumo de agua de maíz y soja en condiciones de bienestar hídrico, deficiencias hídricas en diferentes etapas del ciclo y en secano.

- 6) Determinar la productividad del agua de riego con bienestar hídrico en maíz y soja.
- 7) Calibrar y validar el modelo Aquacrop (Steduto et al., 2009) en maíz y soja para las condiciones agroecológicas del litoral del país.

1.3. MARCO TEÓRICO

1.3.1. Determinación del rendimiento en maíz y soja

La producción de cultivos tiene por objeto la cosecha de una parte de la biomasa producida durante el crecimiento, la misma es el resultado final de la captura de recursos (CO_2 , agua y nutrientes), la cual tiene como principal fuerza motriz a la radiación solar, a través de la participación en los procesos de fotosíntesis y transpiración (Evans, 1993).

El rendimiento en grano de un cultivo puede ser explicado por el producto de la biomasa total producida por el índice de cosecha (IC) que es la relación entre la biomasa depositada en los granos y la biomasa total. La producción de biomasa depende del crecimiento del cultivo, que es resultado de la división y el alargamiento celular de los órganos diferenciados. Estos dos procesos son consecuencia de la producción, transporte y acumulación de fotoasimilados y nutrientes (Cárcova et al., 2003a).

La tasa de crecimiento de un cultivo (biomasa acumulada por unidad de tiempo), resulta del balance de dos procesos contrapuestos: uno que fija CO_2 (fotosíntesis) y otro que gasta CO_2 (respiración). La fracción de C fijado que se destina a la respiración es relativamente constante, por tanto aumentos en la radiación solar interceptada se traducen en aumentos proporcionales en la tasa de crecimiento de los cultivos (Gallagher y Biscoe 1978, Monteith 1977).

La radiación solar interceptada por un cultivo resulta de la radiación incidente y la eficiencia de intercepción del cultivo. La producción de fotoasimilados puede ser expresada en términos de la eficiencia para convertir la radiación solar interceptada en biomasa. De la radiación total incidente, sólo la fracción fotosintéticamente activa del espectro visible es aprovechada por el cultivo (400-700 nanómetros). La radiación incidente varía con la ubicación geográfica, la duración del ciclo del cultivo y la dinámica de intercepción. Ésta se encuentra relacionada a la evolución del índice de área foliar (IAF) del cultivo (Cárcova et al., 2003a).

El IAF se genera con la aparición y expansión de las hojas, y es producto del número de hojas y del tamaño de las mismas. El tamaño de las hojas depende de la duración y de la tasa de expansión foliar. La temperatura modifica el IAF ya que actúa en función directa sobre la tasa de expansión y en función inversa sobre la duración foliar. La intercepción de radiación solar depende del momento en el ciclo del cultivo y del valor de IAF logrado, el cual debe permitir interceptar la mayor proporción de radiación incidente y durante el mayor tiempo posible (Cárcova et al., 2003a).

El IC refleja la partición de fotoasimilados hacia los granos, definiéndose como la proporción del peso seco acumulado en los granos en relación a la biomasa total. Se debe considerar que el IC posee un valor relativo en el análisis de la partición real de la biomasa, ya que calculado de la manera antes mencionada no tiene en consideración la biomasa producida en el sistema radicular. Por otra parte, no considera el contenido energético de la biomasa producida en términos de requerimientos de glucosa. La producción de lípidos y proteínas es más costosa que la de carbohidratos (Cárcova et al., 2003a).

La generación del rendimiento de un cultivo es un proceso complejo y se produce en diferentes etapas del ciclo, de acuerdo al aporte que van realizando distintas estructuras del cultivo. En ese marco de análisis, es posible concebir al rendimiento como un conjunto de componentes que se van generando durante el desarrollo del cultivo, quedando cada uno de ellos fijado en determinado momento del ciclo. Los componentes numéricos principales del rendimiento en los cultivos para granos son: el número de granos por unidad de superficie y el peso promedio de granos, por tanto, el rendimiento puede explicarse como el producto de ambos componentes. Los componentes del rendimiento se generan en forma sucesiva a lo largo del ciclo del cultivo. Para todos los cultivos de grano, existe una primera etapa vegetativa en la cual se determina el número de plantas por superficie. Luego continúa una segunda etapa, la reproductiva en la cual se determina el número de estructuras reproductivas y el número de granos por estructura reproductiva, en la etapa final del ciclo se define el peso de grano (Cárcova et al., 2003a).

La duración de las etapas depende del cultivo, de la variedad y la interacción con el ambiente. La determinación de los componentes numéricos es un proceso secuencial, no obstante, los cultivos como la soja que presentan crecimiento indeterminado y etapas reproductivas amplias, existe un cierto grado de superposición en la determinación de ambos componentes del rendimiento. La magnitud del componente generado depende de la relación fuente-fosa en el estadio de desarrollo en que se determina el componente. Por ese motivo, existe una relación directa entre la tasa de crecimiento en esa etapa y el componente generado (Cárcova et al., 2003a).

Sin embargo, la sensibilidad ante modificaciones de la relación fuente-fosa es diferente entre los componentes. Esto ha llevado a definir al PC de determinación del rendimiento como aquella etapa del ciclo de los cultivos en la que las disminuciones en la tasa de crecimiento del cultivo inciden más que en otras etapas, y explican en mayor medida las variaciones del rendimiento. Por tanto, el PC coincide con la etapa en que se determina el principal componente numérico del rendimiento, que es el número de granos por unidad de superficie (Cárcova et al., 2003a). Hay evidencia suficiente para determinar que el rendimiento en los cultivos y el IC son función, principalmente, del número de granos fijados por unidad de superficie (Cantagallo et al. 1997, Cirilo et al. 1992, Frugone et al. 1992, Andriani et al. 1991).

El estado fisiológico del maíz durante el entorno de la floración determina el número de granos fijados (Andrade et al. 1996, Uhart y Andrade 1991, Fisher y Palmer 1984, Edmeades y Daynard 1979, Tollenaar 1977). En soja el número de granos por superficie fijados depende del estado del cultivo en periodos reproductivos más avanzados (R4-R6; Andrade, 1995).

En el maíz, variando la disponibilidad de recursos hídricos, el número potencial de flores por planta no es muy afectado (Valentinuz et al., 1996). Los procesos de generación de hileras por espiga y espiguillas por hilera son relativamente insensibles a variaciones ambientales y de manejo (Otegui 1997, Otegui y Melón 1997, Uhart y Andrade 1995, Cirilo y Andrade 1994a). La determinación del número de granos por espiga en maíz es función de la supervivencia de espiguillas y de granos, más que del total de espiguillas generadas. El aborto de las espiguillas o de los granos fecundados

se produce hasta dos o tres semanas posteriores a la floración (Cirilo y Andrade 1994b, Fisher y Palmer 1984, Tollenaar 1977). Por otra parte, la detención del crecimiento de la primera espiga en plantas estériles, o de la segunda espiga en plantas prolíficas, se produce cerca del momento de la floración (Tollenaar 1977). Por lo tanto, el número final de granos por individuo se determina en el entorno de la floración y está asociado a la tasa de crecimiento del cultivo en esa etapa (Vega et al. 1997). En el caso de que la tasa de crecimiento por planta en maíz durante esta etapa disminuya de 4 g día^{-1} , la disminución del número de granos por espiga es marcada. En cambio, en la soja, tanto la cantidad de flores diferenciadas como el número de semillas por planta son proporcionales a la disponibilidad de recursos por planta durante un amplio periodo reproductivo (Valentinuz et al., 1996). El número de granos por individuo se fija principalmente durante el llenado de granos (R4-R6) y es función de la tasa de crecimiento durante esta etapa (Vega et al., 1997).

El peso del grano es el último de los componentes numéricos del rendimiento en ser determinado, y puede ser expresado como el producto de la tasa de crecimiento durante la etapa de llenado de grano y la duración de la misma. La dinámica de acumulación de materia seca en el grano tiene tres etapas: la primera fase es de actividad principalmente mitótica, en la que se determina el número de células en los granos (endospermáticas en maíz y cotiledonares en soja) y la cantidad de las organelas de acumulación de sustancias de reserva. Esta etapa se denomina fase lag en la que el peso del grano aumenta levemente (Reddy y Daynard, 1983).

Luego ocurre la etapa de crecimiento lineal, en la que se destaca una marcada acumulación de biomasa en el grano. La tasa de crecimiento del grano de maíz no es afectada por modificaciones en la fuente durante el periodo de llenado efectivo (Andrade y Ferreiro, 1996).

La tasa de llenado en esta etapa es función directa de la temperatura y la duración del llenado es función inversa de la misma. Por lo tanto, la amplitud térmica, es la mejor condición para mejorar el peso de grano. En soja, la dinámica de acumulación de materia seca en el grano es afectada por la disponibilidad de asimilados por planta durante la etapa de llenado de grano. En la fase lineal del llenado se define el

rendimiento en este cultivo. Cuanto mayor es la tasa de crecimiento del cultivo en este periodo y mayor la duración de esta etapa crítica, mayor es el rendimiento (Andrade y Ferreiro 1996, Andriani et al. 1991). El rendimiento de soja está generalmente limitado por la capacidad de la fuente fotosintética a partir de R4 (Egli y Leggett, 1976). La etapa tres del llenado de grano es a partir de la madurez fisiológica, en la cual se corta la relación con la planta y cesa la deposición de biomasa, esta etapa finaliza cuando se alcanza el máximo peso seco del grano. Esta etapa no afecta en forma significativa el rendimiento de los cultivos, ya que los dos componentes numéricos del mismo, en esta etapa, se encuentran plenamente determinados. En general, la relación entre los componentes numéricos del rendimiento es negativa, ya que en la medida que se incrementa el número de granos por unidad de superficie tiende a disminuir el peso de grano. No obstante, la variación, en esta relación, con modificaciones del ambiente no es constante, esto impide predecir la respuesta en rendimiento en grano en función del análisis de un solo componente (Slafer et al., 1996).

1.3.2. Deficiencias hídricas en cultivos

Las limitantes al consumo de agua son el principal factor responsable de las pérdidas de rendimiento en los cultivos de secano (Boyer, 1982). La producción de biomasa está determinada por el agua disponible (AD) en el suelo. La fijación de biomasa en los cultivos que se realiza a través del proceso de fotosíntesis, y el gasto de agua por transpiración, se producen a la misma vez. La entrada de CO₂ y la salida de vapor de agua en las plantas utilizan la misma vía, los estomas de las hojas. Cuanto mayor es la apertura de los estomas, más fácil es la entrada de CO₂, pero también es mayor la velocidad de salida del vapor de agua de la parte interna de las plantas (Medrano et al., 2007).

El consumo total de agua de los cultivos posee dos componentes, la transpiración de las plantas y la evaporación de agua desde el suelo. La transpiración es la fracción vinculada a la fotosíntesis y al crecimiento de los cultivos. La transpiración implica un flujo de agua desde la fuente representada por el agua extraíble y almacenada en el suelo hasta el destino representado por la atmósfera. Existe una estrecha y directa

relación entre la cantidad de agua transpirada y la producción de granos. Una restricción al suministro de agua que disminuya la transpiración por debajo de la tasa determinada por la demanda evaporativa provoca una reducción en la producción de biomasa (Dardanelli et al., 2003).

Los cultivos en condiciones de disponibilidad hídrica no limitante y con un contenido de AD en el suelo que se encuentre por encima de determinado umbral, extraen agua sin provocar efectos negativos sobre el crecimiento. El umbral mencionado varía en maíz entre 40 y 60% del AD (Dardanelli et al. 1991, Muchow y Sinclair 1991, Shaw 1988).

En el caso de que el agua para los cultivos sea limitante y se encuentre por debajo de los umbrales mencionados, la transpiración se reduce en función de las características del cultivo como: la capacidad para absorber agua, el ajuste osmótico y factores del suelo como el contenido de AD y la conductividad hidráulica. Las reducciones en la transpiración provocan descensos en la fijación de CO₂ y como consecuencia disminución en la producción de biomasa y/o disminuciones en la parte de la biomasa que es cosechada, o sea, reducciones en el IC (Fereres y Soriano, 2007).

La oferta de agua para los cultivos de secano varía fuertemente entre ambientes, en función principalmente de las PP de cada sitio y de su distribución (Otegui, 2009). La capacidad de almacenamiento de AD de los suelos de Uruguay es escasa (Molfino y Califra, 2001), en relación al consumo de los cultivos (Giménez y García Petillo, 2011). Esta situación transforma a las recargas hídricas durante los ciclos, en la principal fuente para cubrir las necesidades de agua. Las recargas se producen a través de las PP, las cuales poseen un comportamiento altamente variable en volumen, momento de ocurrencia y en intensidad de cada evento (Baethgen y Terra, 2010). Los factores mencionados en conjunto con las elevadas demandas atmosféricas del verano provocan que, en secano, las deficiencias hídricas sean un fenómeno corriente en la producción de cultivos y el comportamiento de las mismas en cada ciclo establezca la disponibilidad de agua, y con ello el potencial de rendimiento.

En la región litoral del país, en la que se realiza más del 85% de la agricultura, se evaluó que las deficiencias de agua promedio, en relación a las necesidades totales se situaron en torno al 37% para maíz, siendo éste el cultivo que presentó mayores diferencias entre las necesidades y las disponibilidades de agua en la agricultura (Giménez y García Petillo, 2011).

El término déficit hídrico define un concepto esencialmente eco-fisiológico, y se relaciona con la limitación en el abastecimiento de agua a los tejidos vegetales (Vila, 2011). La disponibilidad de agua para los cultivos depende de los ingresos de agua al suelo a través de las PP, riego, napas freáticas y ascenso capilar, de la capacidad de almacenar agua del suelo y de las características del sistema radicular para captar el agua almacenada.

Por otra parte, las necesidades de los cultivos dependen del ambiente de producción, principalmente de las demandas evaporativas atmosféricas que están determinadas por las temperaturas, la radiación solar, la diferencia de potencial de vapor de agua y la velocidad del viento y también por las características del cultivo como la superficie foliar total y la arquitectura de la planta.

La falta de disponibilidad hídrica que causan las deficiencias en cultivos puede deberse al déficit hídrico en el suelo o a las demandas atmosféricas excesivas, así como a la interacción de ambos factores. El estrés hídrico es un concepto que hace referencia a cualquier limitación en el funcionamiento óptimo de las plantas, impuesta por la disponibilidad inadecuada de agua (Medrano y Flexas, 2003). El déficit hídrico, fisiológicamente es una alteración del funcionamiento normal de las plantas con consecuencias sobre el crecimiento y/o el desarrollo (Salisbury y Ross, 2000).

Las deficiencias de agua tienen consecuencias en la fisiología y en la morfología de las plantas, y provocan en ellas un descenso del potencial hídrico, del contenido hídrico y de la conductividad hídrica, así como un aumento de la síntesis de ácido abscísico (ABA). Estos hechos dan lugar a un descenso de la conductancia

estomática y del área foliar, y cambios metabólicos provocados por la reducción del agua en las células. En este contexto, las limitaciones de la fotosíntesis provocada por el déficit hídrico no son solo limitaciones a la difusión de CO₂ hacia el estroma, sino que también son importantes las limitaciones en las reacciones fotoquímicas, en el ciclo de Calvin y en el transporte de asimilados (Medrano et al., 2007).

El déficit hídrico provoca en las hojas una pérdida de turgencia celular que, junto a la acción del ABA, cuya síntesis en las raíces aumenta con las deficiencias hídricas, son responsables del cierre de los estomas, lo que supone el lógico aumento de la resistencia estomática a la difusión de CO₂ hacia el estroma. Es ampliamente aceptado que tiene lugar un cierre estomático en respuesta al déficit hídrico, actualmente no hay consenso en la importancia relativa de este hecho, de forma que se encuentran evidencias que tanto sugieren la presencia de limitaciones no estomáticas de la fotosíntesis desde el inicio del déficit hídrico, como otras que sugieren que las limitaciones estomáticas predominan en el inicio del estrés, y las no estomáticas lo hacen en las fases más avanzadas del mismo. En cualquier caso, el cierre estomático tiene también como consecuencia la reducción de la tasa de transpiración (Medrano et al., 2007).

La escasez de agua en el suelo y de la fracción de agua transpirable, provoca una disminución del potencial hídrico del suelo y produce diferentes respuestas en las plantas, como la pérdida de turgencia celular, la síntesis de ABA ya mencionada, y el bloqueo de la síntesis de citoquininas en las raíces, así como un aumento del pH de la savia xilemática (Lichtenthaler 2003, Gollan et al. 1992).

Estos primeros eventos, en la medida que la deficiencia hídrica continúe, desencadenan otros como por ejemplo la cavitación xilemática, la disminución del alargamiento celular, la reducción de la superficie foliar, el cierre estomático, la disminución de la transpiración y de la fotosíntesis. El déficit hídrico en la planta, además de provocar ajustes en el crecimiento, causa importantes modificaciones en el conjunto de procesos que conducen a la asimilación de CO₂. Las consecuencias son, por una parte, la reducción del gasto de agua y por otra la disminución de la

asimilación de CO₂, y por tanto del crecimiento y de la producción de granos (Medrano et al., 2007).

La eficiencia en el uso de agua (EUA) de los cultivos puede entenderse como el volumen de agua que éstos necesitan evapotranspirar para incorporar una determinada cantidad de C proveniente de la atmósfera. De esta manera, la EUA dependerá principalmente de dos tipos de factores: en primer lugar, de aquellas características propias de la especie que tengan relación con la capacidad de optimización de los procesos de asimilación de C y de la evapotranspiración de agua; y en segundo lugar de las características del ambiente en el que crece y se desarrolla el cultivo (Medrano et al., 2007).

La transpiración es un fenómeno difusivo, por el cual el vapor de agua atraviesa los estomas situados en la epidermis de las hojas. El flujo transpiratorio, es impulsado por la diferencia de presiones parciales de vapor entre la hoja y la atmósfera, y limitado por la conductancia estomática (Vila, 2011).

En determinadas condiciones de cultivo, la tasa de agua transpirada en las hojas depende del gradiente de vapor de agua entre los estomas y el aire, y del grado de apertura de los estomas. El gradiente se produce entre una superficie húmeda (las paredes celulares de la cámara sub-estomática) y el aire, y la evaporación requiere energía. A mayor disponibilidad de energía y gradiente, mayor será la tasa de transpiración. Una de las vías para evitar la deshidratación frente a esta imposición del ambiente es el control de la apertura de los estomas, que obedece a la disponibilidad de agua en las raíces. Así la planta ajusta su gasto a la disponibilidad hídrica, reduciendo fuertemente el agua transpirada (Medrano et al., 2007).

La apertura estomática se produce cuando ingresa agua y aumenta la turgencia de las células oclusivas de los estomas, como consecuencia de la disminución de su potencial osmótico. La concentración celular de solutos define el potencial osmótico de las células. La disminución del potencial osmótico se produce por el ingreso de iones como K⁺ y Cl⁻, por la síntesis de malato, y por el desdoblamiento de almidón en las células oclusivas. Debido a la forma arriñonada de estas células, y a que tienen

engrosadas las paredes que limitan con el poro estomático, el aumento de turgencia provoca que las células se arqueen y el poro estomático se abra. Cuando se pierden iones, los estomas se cierran. Los estímulos que desencadenan el mecanismo, provocando la apertura o cierre, son de índole ambiental y endógena, e incluyen a la luz, la concentración foliar interna de CO₂, la temperatura, el estado hídrico de la hoja y la presencia de hormonas vegetales, especialmente ABA (Assmann y Shimazaki, 1999).

El cierre estomático provoca también mayores dificultades de difusión del CO₂ hacia los cloroplastos y con ello, drásticas reducciones de la fotosíntesis. La relación fotosíntesis/apertura estomática ha sido objeto de amplios estudios para un gran número de cultivos (Cifre et al. 2005, Medrano et al. 2002). En dichos estudios se observó que la tasa de fotosíntesis (que corresponde a la producción de nueva biomasa), llega al máximo cuando la conductancia estomática es menor que la máxima, o bien que la conductancia estomática puede reducirse con reducciones menores de la tasa fotosintética. Estos resultados significan que, con gastos de agua bastante inferiores al máximo, la cosecha sólo se reduciría en un pequeño porcentaje. Es decir, controlando la disponibilidad de agua en las raíces (que indirectamente regulan la apertura de los estomas), se puede incrementar fuertemente la EUA (Medrano et al., 2007).

En síntesis, se desprende de los diferentes aspectos analizados que el ambiente de producción y la estrategia de manejo del riego condiciona fuertemente el gasto del agua y la productividad de los cultivos.

1.3.2.1. Deficiencias hídricas en maíz

El maíz es una especie de tipo fotosintético C4 que presenta grandes ventajas para la producción de biomasa y rendimiento. El resultado de tener separados en la planta espacialmente los lugares de absorción de los de fijación de CO₂ provoca una tasa fotosintética neta muy superior que la que poseen las especies C3, especialmente ante déficit hídricos y condiciones de conductancia estomática baja (Azcón-Bieto y Talón, 2000).

Sin embargo, los factores limitantes de la producción en maíz son varios, entre ellos la disponibilidad de nutrientes, los daños causados por plagas y malezas, y la disponibilidad de agua, que explican las diferencias entre los rendimientos potenciales y los reales, y también la interacción de estos factores entre sí, pero sin duda la principal limitante es la disponibilidad hídrica (Salvagiotti, 2009).

La producción de maíz se realiza bajo una amplia gama de condiciones climáticas, sin embargo, la superficie destinada al cultivo se concentra en las regiones en que las PP superan los 250 mm al año (Shaw, 1988). El consumo potencial de agua en maíz es variable de acuerdo a la región y principalmente de acuerdo a la demanda atmosférica del lugar. Çakir (2004) obtuvo resultados de evapotranspiración potencial entre 700 y 800 mm, y diferentes autores en la región del cono sur obtuvieron valores de evapotranspiración entre 500 y 600 mm (Andrade y Gardiol, 1995; Otegui 1992). Asimismo, Nagore et al. (2013) estimaron la evapotranspiración para tres híbridos, lograron rendimientos similares, y el consumo de agua promedio fue de 646 mm con riego. Por otra parte, Rivetti (2007) evaluó un consumo de agua en maíz de 575 mm y el agua aplicada por riego varió entre 300 y 360 mm.

Asimismo, Giménez y García Petillo (2011), estudiando la ET_c en distintas regiones del país encontraron valores de ET_c total que variaron de 536 a 670 mm dependiendo de la región analizada. Estos valores evidencian que los requerimientos hídricos de los cultivos generalmente no se cubren con las PP promedio. En regiones templadas, los cultivos sembrados en fechas tempranas alcanzan una mayor ET_c acumulada, debido a la duración mayor del ciclo de crecimiento, y a una ET superior durante el período de llenado del grano (Andrade, et. al. 1996).

En estudios sobre extracción de agua en maíz, Panda et al. (2004) y Singh y Singh (1995) encontraron que la absorción se realizaba principalmente en los horizontes más superficiales del suelo (0 a 0,5 m). Por otra parte, Farré y Faci (2009) y Gordon et al. (1995) trabajando con riego moderado y secano respectivamente, hallaron que la absorción se realizó entre 0 y 0,9 m, disminuyendo el consumo de agua a 1,2 m. Kang et al. (2000) trabajando con deficiencias hídricas leves y moderadas en el período vegetativo, y desapareciendo éstas antes de la floración, no obtuvieron diferencias con el tratamiento en bienestar hídrico en dicha etapa, lo cual justificaron

por la alta relación raíz/parte aérea que presentaron los tratamientos con déficit hídrico.

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

El efecto más importante del estrés hídrico en maíz es la reducción del crecimiento del cultivo. Los asimilados utilizados para el crecimiento provienen de la fijación fotosintética del CO_2 en los tejidos clorofílicos. La apertura estomática permite la difusión de CO_2 desde la atmósfera hacia la cámara sub-estomática para la posterior fijación como estructuras carbonadas. La disminución de la tasa de transpiración ante situaciones de déficit hídrico siempre va acompañada de una disminución en la absorción de CO_2 y por lo tanto de la fotosíntesis (Azcón- Bieto y Talón, 2000). Pero además de una inhibición del crecimiento el déficit hídrico modifica la evolución fenológica del cultivo (Della Maggiora et al., 2008), su morfología como grandes aumentos en la relación parte aérea/raíz.

En el sur de Argentina, Andrade et al. (1996) encuentran que, dentro de la estación de crecimiento, no hay casi margen para modificar las fechas de siembra de los cultivos y permitir quedar fuera de las máximas demandas atmosféricas, y con ello mejorar los balances hídricos de suelo, a la vez que potenciar el crecimiento y el rendimiento en maíz. En el mismo sentido opinan Giménez y García Petillo (2011) para el litoral de Uruguay, quienes indicaron que a través de cambios en las fechas de siembra se intentó ubicar el PC en épocas del año en que las demandas atmosféricas no fueran las máximas, pero esto no significó incrementos estables en los rendimientos. Asimismo, para la misma región Ernst et al. (2011) reportaron que en varios años el rendimiento obtenido de maíz en siembras tempranas fue mayor al de los cultivos sembrados tarde, comportamiento que se revirtió en temporadas posteriores. En definitiva, en la región el escape no es una alternativa efectiva para mejorar los balances hídricos en maíz, si bien las demandas atmosféricas son más o menos estables, el comportamiento altamente variable de las PP provoca que esta herramienta sea de baja efectividad en mejorar las condiciones hídricas del cultivo.

El déficit hídrico es uno de los principales factores que afectan la producción de maíz. En Uruguay, las deficiencias hídricas promedio estimadas por Giménez y García Petillo (2011), para un periodo de 24 años, fueron de 170 y 300 mm para el norte y sur, respectivamente.

El consumo de agua, y por ende el crecimiento de maíz, se ven reducidos cuando el contenido de agua del suelo en la zona radical desciende a valores por debajo de 40-60% del AD dependiendo de las condiciones atmosféricas y de la etapa de desarrollo (Muchow y Sinclair 1991, Shaw 1988). Similares valores reportan Della Magiora et al. (2000), quienes demostraron que la transpiración del cultivo se vio fuertemente afectada cuando la fracción de AD cayó por debajo de 50-55%, y este rango de AD en el suelo ha sido sugerido como umbral a partir del cual la evapotranspiración real se reduce con respecto a la máxima.

En ese sentido, Fereres y Soriano (2007) reportaron una estrecha relación entre el agua consumida por el maíz y la producción obtenida. El déficit hídrico en cualquier momento del ciclo puede causar reducciones en el rendimiento dependiendo de la magnitud, pero particularmente en maíz, también depende del momento del ciclo en que ocurra (Andrade y Gardiol, 1995). En concordancia con este concepto, Magalhaes y Da Silva (1987) encuentran que el efecto de la falta de agua en la producción de grano es particularmente importante en tres estadios de desarrollo de maíz, a la iniciación floral, momento en que se determina el número potencial de granos, durante el periodo de fecundación, que es cuando se fija el potencial de producción y en la fase de llenado de grano, que es cuando ocurre la acumulación de materia seca en los mismos.

Los síntomas visibles del estrés hídrico sobre el maíz son la reducción del crecimiento, la disminución de la biomasa depositada y el rendimiento del cultivo. Se ha demostrado que el estrés hídrico en el maíz reduce la altura de la planta (Çakir, 2004), el IAF (Traore et al., 2000) y el crecimiento de las raíces (Jama y Ottman, 1993). Los déficits disminuyen la expansión foliar y/o aumentan la senescencia, por lo tanto, afectan la intercepción de la radiación. En la medida en que disminuye el área foliar, ya sea por menor expansión o por mayor tasa de senescencia, se produce

una reducción de la superficie transpiratoria y de la cantidad de radiación interceptada por el cultivo (Otegui, 1992). El maíz posee alta sensibilidad estomática, mayor a la del girasol y la soja (Andrade y Gardiol 1995, Bennett et al. 1987, Boyer 1970). Si bien el maíz es sensible al estrés hídrico en estado vegetativo, ya que reduce la expansión foliar y la tasa fotosintética, y por ende hay un menor crecimiento, pasado el estrés, la planta puede recuperar área foliar antes de llegar al PC y así lograr altas tasas de crecimiento en dicho período, la disminución del rendimiento va a ser leve o nula (Abrecht y Carberry 1993, Eck 1986, Stegman 1982).

En estudios realizados para evaluar los efectos de las deficiencias hídricas en maíz se determinó que en la etapa vegetativa disminuyó la biomasa total entre 28 y 32% en relación con los tratamientos con bienestar hídrico, pero no se generaron diferencias en el rendimiento (Çakir, 2004).

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

El rendimiento se reduce ante el estrés hídrico en cualquier etapa del cultivo, pero el efecto fue más grave durante las etapas reproductivas (Payero et al., 2009). El estrés hídrico durante las etapas vegetativas reduce el total de biomasa producida (Payero et al. 2009, Rivetti 2007, Tolk et al. 1998) por lo que limita el potencial de rendimiento desde inicios de la estación de crecimiento. Las deficiencias hídricas en torno a la floración fueron identificadas como las más perjudiciales para la producción de grano y detectan mermas del entorno de 50% (Andrade y Gardiol, 1995). En el mismo sentido estos autores sugieren que el maíz no debe sufrir deficiencias hídricas durante el periodo comprendido entre V13-R3 para no afectar el número de granos. Los mismos autores, señalan que tampoco deberían ocurrir estas deficiencias durante

el llenado de los granos (R3-R6) para lograr elevados niveles de producción, ya que en este periodo las pérdidas en rendimiento oscilan entre un 20 y 40%.

En cambio, Hergert et al. (1993), Bergonci et al. (2001) concluyeron que las deficiencias hídricas que se produzcan durante el período vegetativo afectarán escasamente el rendimiento, ya que no influyen en la determinación del número de granos por espiga. Por el contrario, deficiencias causadas durante la floración femenina fueron las más perjudiciales para la producción de grano.

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

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

El rendimiento disminuye al reducirse los componentes principales del mismo, como el número de granos m^{-2} y el peso promedio de grano (Pandey et al. 2000, Otegui et al. 1995). Grant et al. (1989) afirmaron que fue evidente que el intervalo sensible al déficit hídrico para el número de granos comenzó siete días a partir de la emisión de los estigmas y finalizó 16 a 22 días después, estos autores encontraron que la reducción del número de granos causada por la sequía, no es absolutamente dependiente de la prevención de la fertilización de los óvulos, sino que también del cese del desarrollo de algunos granos post-fertilización. Westgate y Boyer (1985) reportaron que la sequía en maíz cuando ocurre en etapas tempranas del desarrollo reproductivo, se manifiesta en una reducción del número de granos, debido principalmente a la absorción del ovario o esterilidad del polen; esto debido a que el déficit hídrico inhibe la fotosíntesis y disminuye el flujo de fotosintatos a los órganos en desarrollo.

En el entorno de la floración, se producen mermas importantes en el rendimiento en grano pudiendo verse disminuido el IC (Sinclair et al., 1990). El rendimiento final suele relacionarse fuertemente con el índice de área foliar (IAF) a floración. Un estrés hídrico en la floración del maíz reduce la eficiencia de conversión en biomasa de la radiación interceptada, y posiblemente la intercepción de radiación (por aceleración de la senescencia de las hojas) y la partición de asimilados a espigas, por esos motivos aumenta el aborto de estructuras reproductivas y disminuye la producción final de granos (Andrade et. al., 1996).

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

En ese sentido, Payero et al. (2009) reportaron que el PC fue la etapa más sensible al déficit hídrico, ya que se redujo la producción de grano en 60% de casi 13000 kg ha⁻¹ potenciales, por haber dispuesto solo de un 40% AD durante el mismo periodo.

Asimismo, Çakir (2004) reportó que un corto déficit al comienzo del PC causó reducciones de 40% del rendimiento, mientras que deficiencias más prolongadas pueden llegar a disminuir hasta un 93% con respecto a no sufrir deficiencias hídricas. En trabajos en que se indujeron deficiencias constataron que producto del déficit hídrico durante el PC se redujo la transpiración diaria del cultivo a 2,5 mm día⁻¹ y se produjeron 3721 granos m⁻² y un rendimiento de 8977 kg ha⁻¹, mientras que el tratamiento sin déficit alcanzó los 5153 granos m⁻² y 13627 kg ha⁻¹ (Della Maggiora et al., 2008).

Las deficiencias hídricas durante el llenado de grano reducen la tasa fotosintética y aceleran la senescencia foliar, disminuyendo la asimilación total, presentando reducciones en el rendimiento en el entorno de 21 a 40% (NeSmith y Ritchie, 1992), estos autores concluyen que la importancia del estrés hídrico sobre el rendimiento en esta etapa depende de cuán temprano ocurra el mismo

Las etapas menos sensibles al déficit hídrico se ubican en los estadios vegetativos tempranos y a partir de grano lechoso (Çakir, 2004). En tal sentido, los tratamientos con omisión de un solo riego en R3 generaron mermas en el rendimiento que variaron de 15 a 28% dependiendo las PP de cada año experimental. El déficit durante el llenado de granos reduce el peso de los mismos (Della Maggiora et al. 2008, Grant et al. 1989), por aumento de la senescencia y acortamiento de dicho periodo. En trabajos de Payero et al. 2009 las deficiencias de agua durante la etapa de llenado de granos produjeron una reducción en el peso de los mismos de 26%, la que explicó la disminución del rendimiento de 29%.

1.3.2.2. Deficiencias hídricas en soja

El déficit hídrico afecta el crecimiento y el rendimiento de soja a través de su acción en la fotosíntesis y también en la fijación biológica del nitrógeno (FBN), esta última disminuye antes incluso que la fotosíntesis, en situaciones de estrés hídrico. La intensidad del déficit hídrico debe relacionarse con la capacidad potencial de almacenaje de agua del suelo, la capacidad de exploración radicular y con el estado de desarrollo del cultivo (Sawchik y Ceretta, 2005).

La etapa de ocurrencia de la deficiencia hídrica es importante, porque a una misma intensidad de deficiencia, el efecto sobre el rendimiento será distinto según el estadio del cultivo debido a la diferente capacidad de compensación que posee la soja según la etapa del ciclo (García y Ferrarotto, 2009). Existen tres sub-períodos de importancia y con respuesta diferenciada a la ocurrencia de estrés hídrico. Estos son el período vegetativo, que va desde la emergencia a inicios de floración (VE-R1), el comprendido entre inicio de la floración e inicios de fructificación (R1-R3) y el que corresponde mayoritariamente al llenado de granos (R4-R6) (Andriani, 2002).

La soja es considerada una planta no tolerante a las sequías, siendo menos sensible al estrés hídrico durante la fase vegetativa, medianamente sensible en la floración y muy sensible durante el llenado de granos (Eck et al., 1987).

En trabajos en que se evaluaron dos intensidades de deficiencia hídrica entre V4 y R1, se reportó que las únicas variables que fueron afectadas eran la longitud de los entrenudos y la altura de planta, dando lugar a una menor acumulación de MS

(Desclaux et al., 2000). Esto concuerda con lo publicado por Karam et al., (2005), que indican que diferentes intensidades de déficits durante la etapa vegetativa no afectaron los componentes del rendimiento.

Las deficiencias hídricas de mediana intensidad (40-50% de AD en el suelo) entre emergencia y floración, no producen reducciones en el rendimiento en grano, si bien pueden disminuir el área foliar y la altura de planta. Las deficiencias con intensidades mayores (20-40% de AD) podrían producir reducciones en el rendimiento del orden del 10% (Andriani, 2002).

Las condiciones de estrés hídrico al comienzo de las etapas reproductivas disminuyen el área foliar, la eficiencia de conversión y aumentan el aborto de estructuras reproductivas. El aborto puede ser compensado parcial o totalmente por la fijación de nuevas vainas y/o por aumento del peso de los granos una vez superado el estrés (Andriani et al., 1991).

En caso que las deficiencias hídricas se reviertan relativamente temprano en el ciclo, el menor número de granos puede compensarse por un aumento en el peso de los granos. Aunque estas compensaciones no son totales, habiendo pérdidas de rendimiento (Dogan et al. 2007, Karam et al. 2005). El grado de compensación, es claramente dependiente del IAF remanente, de las condiciones de radiación imperantes, de la sanidad del cultivo y de la temperatura. Por lo tanto, en un cultivo en el cual la sequía haya estado acompañada por temperaturas excesivamente altas, que haya producido una elevada senescencia y que no presente una sanidad óptima, será incapaz de crecer a la máxima tasa y, por lo tanto, no expresará los valores máximos de compensación (Kantolic et al., 2003).

Si el déficit ocurre entre R1 y R5, intensidades medias de deficiencias (40 a 50% de AD), en las que la TCC es afectada pueden ocasionar reducciones en el rendimiento del 10% y deficiencias severas reducen un 20% o más (Frederick et al., 2001). La reducción del rendimiento se debe al aborto de flores y vainas disminuyendo el número final de estas últimas, siendo en parte compensado por el peso de los granos, si cesa la deficiencia hídrica en la etapa siguiente (Andriani, 2002). Según Kantolic et al., (2003), el periodo R1-R3 no es tan crítico, ya que la soja genera muchas más flores de las que puede sostener y la pérdida de vainas en estos estados puede ser

compensada por fijación de otras vainas en los siguientes estados, debido a la superposición de estos, una vez levantado el estrés. Además, aumenta la disponibilidad de asimilados por unidad de grano lo que incrementa el peso promedio de los granos minimizando la pérdida de rendimiento.

En situaciones en que el estrés ocurre durante la formación de vainas, el mayor efecto es la reducción del número de vainas (Desclaux et al., 2000). Un estudio llevado a cabo por Dogan et al. (2007), demostró que una deficiencia hídrica en el período de fijación y llenado de vainas producía pérdidas de rendimiento del 30% y reducción en el peso de los granos significativa.

Las mayores disminuciones del rendimiento se producen cuando el estrés coincide con el periodo más crítico de determinación del rendimiento, que va desde R4 a R6 o sea la etapa de formación de vainas y llenado de granos (Dogan et al. 2007, Karam et al. 2005, Kantolic et al. 2003, Andrade y Sadras 2000, Sionit y Kramer 1977). Sadras y Calviño (2001) encontraron que un déficit hídrico de 200 mm entre R3-R5, puede llegar a reducir hasta dos tercios la producción, por cada mm de déficit hídrico observado hay una reducción de 16 kg ha⁻¹ en la productividad. Como ya fuera indicado el PC es la etapa en la cual se fija la mayor proporción de los granos, que es el principal componente del rendimiento.

Los mecanismos de compensación del rendimiento, por aumento del peso de los granos, no son suficientes para evitar pérdidas de rendimiento, en la medida que exista una reducción significativa en el número de granos por superficie. A partir de R6 no se generan nuevas estructuras reproductivas para compensar un bajo número de granos fijados en las etapas anteriores (Kantolic et al. 2003, Sionit y Kramer 1977). En el caso de que las etapas afectadas por deficiencias se ubiquen entre R5 y R7, el estrés produce la reducción simultánea del número de vainas y del número de granos (Karam et al., 2005).

La duración del período de llenado de grano (Brevedan y Egli, 2003) y el peso promedio de los granos, es determinado genéticamente (Pandey y Torrie, 1973), pero es influenciado por el ambiente. La falta de agua durante el llenado de granos acorta este período (Desclaux y Roumet, 1996), limitando el rendimiento principalmente

por la reducción del tamaño y el peso de grano (Dogan et al. 2007, Salinas et al. 1996, Sionit y Kramer 1977).

La ocurrencia de estrés durante el inicio del llenado de granos puede reducir drásticamente el rendimiento, ya que la mitad de los nutrientes necesarios para el llenado provienen del suelo y el resto de la FBN y como se indicó anteriormente éste es un proceso también afectado por el estrés hídrico (Neumaier et al., 2000).

Brevedan y Egli (2003), evaluando estrés hídrico durante diferentes etapas del llenado de granos indicaron, que se produce una reducción de 39% en el rendimiento y del 24% en el peso de granos. Cuando el estrés fue corto y ubicado al inicio del período de llenado, el rendimiento fue de 10 a 23% menor y el peso de los granos disminuyó entre 9 y 17%. Andriani et al. (1991) reportaron que deficiencias hídricas del 50% en etapas de llenado generan una respuesta al agregado de agua de 8,1 kg ha⁻¹ por mm adicional. En cambio, la respuesta fue de 2,3 kg ha⁻¹ por mm cuando la sequía fue en etapas reproductivas más tempranas. Se evidencia la mayor respuesta del cultivo al riego en el llenado de granos en comparación con la floración.

Thomas y Costa (1994), reportan que el mayor rendimiento en el tratamiento regado fue explicado por la mayor interceptación de radiación y por un período de llenado más prolongado. A partir de R6 los días hasta madurez fisiológica fueron 26, para el tratamiento regado mientras que 10 días en el tratamiento no regado, evidenciando un período de llenado de granos más corto. El estrés continuo durante esta etapa acelera la senescencia y baja el rendimiento explicado porque las plantas pierden más rápidamente nitrógeno y clorofila por sus hojas que plantas no estresadas (Brevedan y Egli 2003, Desclaux y Roumet 1996). El levantamiento del estrés hídrico después de períodos de deshidratación entre R5-R7 no eliminó totalmente el proceso de senescencia, ya que el IAF no alcanzó los niveles del tratamiento sin deficiencias hídricas y hubo una aceleración evidente de la senescencia (Karam et al., 2005).

El estrés hídrico acelera la senescencia y lo hace aún más en estados avanzados de la fase reproductiva, en el caso de que el cultivo sufra un estrés hídrico posterior a R6, si la disponibilidad hídrica aumenta el área foliar no se incrementa significativamente (Desclaux y Roumet, 1996).

En relación al IC las deficiencias hídricas durante las etapas reproductivas tempranas pueden aumentar el IC, ya que la falta de agua detiene el crecimiento vegetativo sin llegar a afectar el rendimiento en forma significativa (Andriani et al., 1991). Sin embargo, Spaeth et al. (1984), señalan que el IC no se modificaba cuando se aplicaron deficiencias hídricas severas en distintos momentos del ciclo, como durante el crecimiento vegetativo, la floración, o la fijación de semillas. No obstante, Board y Modali (2004), reportaron una relación inversa entre el rendimiento y el IC, esto indica que los factores ambientales y culturales no generan aumentos de rendimiento a través de una mayor partición de la MS hacia los granos.

1.3.3. Riego suplementario

El riego suplementario es una herramienta que en general aumenta la productividad y mejora la estabilidad del rendimiento de los cultivos, esto permite una mayor certidumbre económica en la agricultura (Vallone et al., 2003). Es una técnica que adicionalmente produce un impacto significativo en la producción por potenciar los beneficios de algunas prácticas tecnológicas (Pérez y Peña, 2013) como la fertilización nitrogenada.

La incorporación del riego a los sistemas productivos ayuda a ampliar el rango de gestión del riesgo y de esa manera aprovechar mejor las oportunidades sin aumentar la vulnerabilidad (Baethgen y Terra, 2010). En ese sentido, el riego es la tecnología que permite resolver las habituales deficiencias hídricas de los cultivos realizados en secano. Sin embargo, en Uruguay, el riego es escasamente utilizado en la agricultura exceptuando al arroz y la caña de azúcar. En soja sólo en el 0,6% del área comercial en regada y en maíz aproximadamente el 12% de la superficie total es desarrollada con riego (MGAP-DIEA, 2016).

La escasa adopción del riego en maíz y soja a nivel comercial se debe a varios factores, entre los que se destacan, los elevados costos e inversiones de la tecnología, la ausencia de fuentes de agua en la región donde se realizan mayoritariamente los cultivos y la falta de conocimientos en riego de técnicos y productores. Además, un motivo central de la baja adopción es que existe la posibilidad de realizar los cultivos en secano en forma rentable debido a un régimen de PP que supera los 1300 mm

anuales, no obstante, las deficiencias hídricas habituales provocan rendimientos bajos e inestables.

La programación del riego implica conocimientos acerca de la disponibilidad de agua como la calidad y la cantidad, así como información del cultivo como las etapas de mayor respuesta a la aplicación del riego. Se requiere conocer la capacidad de retención de agua del suelo para poder evaluar un potencial riesgo de degradación y las características del clima principalmente las demandas atmosféricas y las PP (Maturano, 2002). En este sentido, una correcta programación del riego permite optimizar el aprovechamiento de agua aportada por las PP. La conducción del riego refiere al momento y volumen aplicados de agua para lograr el objetivo propuesto (Heermann et al., 1990).

Los requerimientos de riego de los cultivos varían temporal y espacialmente, en función del clima, del manejo, de la etapa de desarrollo y de la variedad del cultivo, por lo que el cálculo del agua de riego debe ser local (Doorenbos y Pruitt, 1977). Pérez y Peña (2013) aportan que la implantación de un programa de uso eficiente del riego requiere certidumbre en los requerimientos de agua.

Un cultivo sin deficiencias hídricas es aquel que crece en un suelo donde el porcentaje de AD en la zona radicular no desciende más que la fracción que puede ser agotada antes de presentar estrés hídrico, la cual se conoce como la fracción de agotamiento (p). García Petillo (2012), indicó que regar bien es dar a las plantas la cantidad de agua necesaria en el momento oportuno, es decir, antes que el contenido hídrico del suelo les genere un estrés que disminuya su rendimiento. La cantidad de agua a aplicar o lámina depende, en principio, de los parámetros hídricos del suelo. A los efectos del riego se considera no la totalidad del perfil de suelo, sino la profundidad de suelo que explora la masa radicular absorbente del cultivo.

En sistemas de producción bajo riego, es de gran importancia conocer la cantidad de agua que consume un cultivo en su ciclo para programar el riego. Además, en condiciones de riego suplementario es necesario conocer el consumo diario de cada cultivo, para determinar las necesidades totales en cada momento del año, calculando

la superposición de demanda de los cultivos intervinientes en el sistema productivo (Andriani, 2002)

La estrategia de riego paradigmática ha sido el suministro de agua suficiente para que los cultivos transpiren en su máximo potencial y así cubrir la totalidad de los requerimientos de ETc. Este enfoque, es cada vez más cuestionado a nivel mundial debido al volumen de agua requerido y a los efectos negativos que tal uso puede tener sobre los recursos naturales (Fereres y Soriano, 2007). En el país, el agua potencialmente disponible para riego no es escasa, pero los costos energéticos de la aplicación de riego son elevados (Piedrabuena, 2010) y cuestionan dicho modelo.

1.3.3.1. Riego suplementario en maíz

El maíz es una especie que posee alta sensibilidad al estrés hídrico, esto provoca que sea dificultoso implementar estrategias de manejo de riego diferentes a las que otorga el bienestar hídrico durante todo el ciclo, sin que ocurran pérdidas de rendimiento (Lamm et al. 1994, Rhoads y Bennet 1990).

La incorporación de riego en maíz genera una estabilidad importante de la producción, obteniéndose a su vez, mayores rendimientos físicos. Por medio de la incorporación de riego en cantidades satisfactorias, es posible al menos duplicar los rendimientos logrados en secano (Pérez y Peña 2013, Piedrabuena 2010, Debórtoli et al. 2005).

En estudios que analizaron la estabilidad de producción del maíz se encontró que los cultivos regados presentan una variación entre años con respecto al promedio que no alcanza el 10%, por otra parte, los cultivos de secano presentan una variación en los rendimientos del 35% (Debórtoli et al., 2005).

El maíz tiene una notable respuesta a las variaciones en el intervalo de riego con resultados satisfactorios, tanto en su desarrollo biológico como en el rendimiento final, cuando se logra mantener una humedad elevada durante todo el ciclo hasta después de la formación del grano (Pérez y Peña, 2013). Estos autores concluyeron sobre el efecto beneficioso que tuvo la aplicación de riego sobre los componentes del rendimiento, y en este sentido señalan que los mejores valores se obtuvieron con riego durante todo el ciclo del cultivo. El rendimiento de maíz logrado fue de 12,6 t

ha⁻¹ con riego durante todo el ciclo, siendo este valor significativamente mayor a los logrados tanto con RD como en secano.

Por su parte, Çakir (2004) observó que los mayores rendimientos fueron obtenidos con riego total frente a las diferentes alternativas de manejo de riego evaluadas. Se puede concluir acerca de las ventajas del riego de 100% de la ETc durante todo el ciclo, el cual, en ausencia de otras limitantes, puede asegurar altos rendimientos, a través de la obtención de un alto número y peso de granos. Asimismo, se indica que la respuesta del maíz al riego suplementario es altamente significativa y probablemente el riego de 100% de la ETc sea excesivo en años húmedos (Puiatti et al., 2002).

La ETc es fuertemente afectada cuando el contenido de agua en el suelo desciende por debajo del 50% del AD (Della Magiora et al., 2000). Según Ojeda-Bustamante et al. (2006) asegurar una humedad adecuada durante las etapas críticas de maíz es esencial para obtener rendimientos óptimos. Las etapas más críticas del maíz, desde el punto de vista hídrico, son durante la floración y el desarrollo temprano de la mazorca (Shaw y Newman, 1987).

El maíz presenta mayor EUA calculada como cociente entre el rendimiento y la ETo con respecto al girasol y la soja (Faraldo et al., 2011). Así, Andrade (1995) afirma que la EUA es casi el doble para el maíz que para la soja y el girasol. Hattendorf et al. (1988) determinaron valores de EUA que variaron de 10 a 24 kg ha⁻¹ mm⁻¹ en maíz y de 5 a 11 kg ha⁻¹ mm⁻¹ para soja.

Maturano (2002) reportó que se estudió la respuesta del maíz a distintos niveles hídricos, los resultados indicaron que con mayor disponibilidad hídrica en la etapa de llenado de granos aumentó la tasa de llenado y la duración de la etapa también fue mayor con respecto a los de menor disponibilidad hídrica.

En riego de maíz, es de mayor relevancia la relación entre rendimiento y el agua de riego aplicada, que la relación entre el rendimiento y la ETc. La limitante del uso de la ETc es que no toda el agua de riego se utiliza en los procesos de ET hay escorrentías y pérdidas por percolación y en segundo lugar que una fracción de la ETc proviene de fuentes distintas de riego como agua almacenada en el suelo y las PP efectivas. Por otra parte, la relación entre el rendimiento y el riego aplicado

puede ayudar a evaluar la productividad del riego en sistemas agrícolas (Tolk y Howell, 2003), y es más conveniente para estudiar la EUA de riego (Farré y Faci, 2009).

El efecto de la distribución del estrés hídrico en el rendimiento del maíz se ha evaluado por diversos autores (Scheierling et al. 1997, Stegman 1982, Denmead y Shaw 1960) y los resultados son concordantes en que la floración es la fase más sensible al déficit hídrico, con reducciones en la biomasa, el rendimiento y el IC (Pandey et al. 2000, NeSmith y Ritchie 1992).

La cantidad de MS fue sensiblemente reducida en condiciones de secano, como también cuando se regó sólo en el PC, comparando con el riego total durante todo el ciclo (Rivetti, 2007). Por otra parte, el mismo autor señala que cuando se disminuyó el riego en las etapas vegetativas y llenado de granos, no se observaron diferencias significativas en la producción de MS, pero sí se manifestó una disminución del 15% cuando sólo se regó en el PC con respecto a riego total.

El maíz puede sobrellevar el estrés hídrico durante el crecimiento vegetativo, pero es sensible durante la etapa reproductiva, lo que lo deja vulnerable cuando el RD no logra superar los agotamientos anteriores de agua en el suelo (Klocke et al., 2014).

En un estudio desarrollado por Ko y Piccinni, 2009 se evaluó el efecto de tres niveles de riego donde los tratamientos fueron riego completo (donde se cubrió la ETc), riego medio (75% de la ETc) y riego mínimo (50% de la ETc) y se encontró que el riego mínimo rindió consistentemente menos que el riego completo y el riego medio, sin embargo, es posible regar al 75% del riego completo con una merma sólo del 10% del rendimiento y lograr mayores EUA. Dichos autores sostienen que la EUA disminuyó linealmente a medida que aumentó el agua que recibió el cultivo siendo la mayor EUA encontrada de 16 kg mm^{-1} .

1.3.3.2. Riego suplementario en soja

La soja a nivel mundial se realiza mayoritariamente en condiciones de secano, una de las razones que justifica esta situación productiva es la plasticidad de la especie en relación con la producción de biomasa y rendimiento. La soja posee posibilidades de ramificar, presenta un amplio periodo de floración y oportunidades de compensar

periodos de deficiencias hídricas debido a las características morfo-fisiológicas indicadas. Sin embargo, hay diferencias genéticas y requerimientos ambientales que se deben considerar en relación a la concreción de la plasticidad del cultivo.

Doorenbos y Kassam (1979) reportaron que las necesidades de agua para la máxima producción de soja varían entre 450 y 700 mm, dependiendo del clima y de la duración del ciclo. Por otra parte, Giménez y García Petillo (2011) estimaron la ETc para una serie de 23 años en dos cultivares y dos zonas muy distintas, norte y sur de Uruguay. En el sur la ETc total para el GM VI fue de 627 mm y en el norte de 641mm, mientras que para el GM IV la misma fue de 567 y 504 mm para sur y norte, respectivamente. Estos autores indicaron que para los dos GM analizados las ETc diarias son superiores en el norte, debido a los valores de radiación solar y temperaturas mayores que en el sur. Sin embargo, la ETc total para el GM IV, fue superior en la localidad sur. Esto se debió a que el GM IV presentó una baja sensibilidad al fotoperiodo y la acumulación térmica fue el factor determinante en la inducción floral y por ende en la duración del ciclo, las temperaturas del norte fueron superiores y por lo tanto la duración del ciclo fue menor (Giménez y García Petillo 2011, Hadley et al. 1984).

La literatura registra un amplio rango de rendimientos máximos de soja con riego a nivel mundial que oscila aproximadamente entre 4500 y 8600 kg ha⁻¹ (Setiyono et al. 2007, Cooper 2003, Lawn et al. 1984, Flannery 1983). Las variaciones detectadas en los rendimientos máximos son consecuencia de la diferente disponibilidad de radiación solar, nutrientes y agua, este último es el factor más limitante por lo que el manejo del agua es un aspecto principal sobre el cual trabajar para disminuir las brechas de rendimiento en soja (Salvagiotti, 2009).

Rodríguez et al. (s.f.), evaluaron la respuesta en rendimiento de soja al riego, los resultados demostraron un mayor rendimiento en los tratamientos donde la oferta de agua fue mayor, también se observó que los mayores rendimientos registraron un nivel de ETc superior. El número de granos por superficie se incrementó con el aumento de la lámina de riego y el mismo se asoció en más de 95% con el incremento de rendimiento.

Los resultados de Sincik et al. (2008) muestran que la ETc de soja aumentó con el incremento de riego y que los aumentos de riego provocan altos rendimientos y a su vez decrementos en la EUA y en la eficiencia en el uso del agua de riego (EUAR).

1.3.4. **Riego deficitario**

La realización de riego tecnificado requiere cuantificar el consumo potencial de agua y evaluar las estrategias de manejo del riego, de acuerdo a los objetivos de producción. Esto significa que no en todos los casos es conveniente lograr la máxima producción del cultivo. Para realizar un uso eficiente del agua de riego, se necesita un preciso conocimiento de la relación entre el uso del agua y el rendimiento y con ello definir la función de producción del agua (Vaux and Pruitt, 1983).

El riego deficitario (RD) es la aplicación de riego por debajo de las necesidades hídricas de un cultivo durante una o más etapas de desarrollo o durante todo el ciclo del cultivo, difiere del suministro de riego total el que tiene por objetivo satisfacer la demanda hídrica integral. La respuesta de los cultivos al déficit hídrico depende del padrón de la deficiencia al que esté sometido el cultivo (Doorenbos y Kassan, 1979). Antes de implementar un programa de RD, es necesario conocer las respuestas de rendimiento de los cultivos al estrés hídrico, ya sea durante las etapas de crecimiento definidos o durante toda la temporada (Kirda y Kanber, 1999). El objetivo principal del RD es aumentar la EUA de un cultivo y eliminar riegos que tienen poco impacto sobre el rendimiento o volúmenes de riego excesivos que no impactan en el incremento de la productividad.

La reducción del rendimiento resultante puede ser pequeña en comparación con los beneficios obtenidos a través de desviar el agua ahorrada para regar otros cultivos o para aumentar el área de riego del mismo cultivo o para bajar los costos del riego (Kirda, 2002). El RD ha sido ampliamente investigado como una estrategia de producción valiosa y sostenible principalmente en las regiones con escasez de agua. Los resultados de investigación confirman que el RD tiene éxito en el aumento de la productividad del agua para diversos cultivos sin causar severas reducciones de rendimiento (Rosadi et al., 2005).

Fereres y Soriano (2007), expresan que, en el futuro, la agricultura de regadío se llevará a cabo en condiciones de escasez de agua y que el suministro insuficiente de agua para el riego será normal, por lo que la gestión del riego pasará de enfatizar la producción por unidad de superficie, hacia la maximización de la producción por unidad de agua. Estos mismos autores mencionan que hay un sistema de RD que combina dos factores: aplicaciones uniformes de agua y agotamiento del agua almacenada en el suelo al aumentar el consumo del cultivo, este modelo se denomina riego deficitario sostenido. Este tipo de riego permite que el estrés hídrico se desarrolle lentamente y que las plantas puedan adaptarse a los déficits de agua en suelos con una capacidad de almacenamiento de agua importante. En virtud del régimen de riego deficitario sostenido, la sensibilidad de la expansión de hojas y de la fotosíntesis al déficit hídrico es diferencial al que ocurre en otro tipo de deficiencias y lleva a la reducción de la producción de biomasa bajo estrés hídrico moderado debido a una reducción en el tamaño de la canopia y de la intercepción de la radiación (Hsiao, 1973). Sin embargo, la distribución de la MS no suele ser afectada y el IC se mantiene.

El RDC se basa en gestionar los niveles de déficit hídrico al que se somete al cultivo a lo largo de su ciclo productivo, atendiendo la sensibilidad de la planta al déficit hídrico (intensidad y duración) en cada una de las fases de su ciclo. Al limitar las aplicaciones de riego en las etapas de crecimiento menos sensibles al déficit hídrico, esta práctica tiene como objetivo maximizar la productividad del agua y estabilizarla, en lugar de maximizar los rendimientos. Por lo tanto, es importante saber la respuesta del cultivo al déficit hídrico moderado en las diferentes fases de crecimiento (Farré y Faci, 2009). Por consiguiente, la diferencia básica entre RDC y riego sin limitación de agua es precisamente que el primero propone que el cultivo esté sujeto a limitaciones de agua, en un período determinado y controlado de su ciclo. El elemento más novedoso del RDC es que parece romper con la idea preestablecida de que la máxima producción se obtiene con la utilización del máximo volumen de agua que el cultivo sea capaz de transpirar. Visión fundamentada hace unos años (Vaux y Pruitt, 1983) y en muchos casos, aún vigente en la actualidad.

Un aspecto central a considerar es que los cultivos tienen diferente sensibilidad a la escasez de agua en las distintas etapas de desarrollo, y el sistema de RDC debe ser diseñado para manejar el estrés y minimizar la caída de los rendimientos. Sin embargo, cuando la disminución del rendimiento, en términos relativos, es menor que la disminución de la ET, la EUA bajo RDC aumenta en relación a la que tiene el riego total. Benjamin et al. (2015) aseveran que para que el RD sea exitoso no debe haber una disminución significativa en la EUA con respecto al riego total.

1.3.4.1. Riego deficitario en maíz

La biomasa aérea de maíz no se vio afectada cuando se aplicó RD desde la etapa de grano lechoso hasta madurez fisiológica (Farré y Faci, 2009). Por otro lado, los mismos autores señalan que el rendimiento fue reducido significativamente con RD desde la etapa de emergencia de los estigmas hasta la etapa de grano lechoso. Por lo general, dicha reducción en el rendimiento fue principalmente debida a un menor número de granos por superficie. Por su parte, Farré (1998) menciona que el crecimiento y el rendimiento en grano no se vieron significativamente afectados con RD durante la fase de llenado de granos.

La respuesta de distintos genotipos de maíz al RD implicó disminuciones de rendimiento a medida que el riego aplicado fue reducido llegando a una reducción del 81%, respecto al riego total (Aydinsakir et al., 2013).

Saseendran et al., 2007, modelaron la producción de maíz con RD y concluyeron que los rendimientos y la EUA fueron maximizadas cuando la cantidad de riego disponible se dividió en 20% durante la etapa vegetativa y 80% en la etapa reproductiva. López Fuster (2000) obtuvo rendimientos de 7000 kg ha⁻¹ con RD, sensiblemente menor a 12600 kg ha⁻¹ obtenido con riego total en España. Asimismo, Trooien et al. (1999), encontraron un aumento en la EUA en maíz usando RD en comparación con riego total.

En relación a la programación del riego, las ventajas potenciales utilizando datos climáticos se han defendido por muchos investigadores. Ali (2010), señaló que, en esta estrategia de riego, el agua se aplica en una cantidad igual a la ET o en una fracción o múltiplos de la misma. Los requerimientos de agua de riego podían ser

disminuidos sustancialmente por debajo de la ET, sin reducir los rendimientos apreciablemente (Fischbach y Somerhalder, 1974).

En experimentos en los que se evaluó el efecto de diferentes cantidades de agua de riego se aplicaron volúmenes equivalentes a la ET diaria y 0,75, 0,50 y 0,33 de la ET, en frecuencias de 1,5 a 7 días, los resultados indicaron que el volumen equivalente a 0,5 de la ET resultó en el mayor rendimiento en todas las frecuencias evaluadas (Fischbach y Somerhalder, 1974). Por su parte, Steele et al. (1994) obtuvieron una reducción de 44% del rendimiento cuando la cantidad de agua aplicada fue equivalente a 0,5 de la ET. Hill y Guron (1973) aplicaron la cantidad de agua equivalente a 1,2; 1,1; 0,75; 0,50 y 0,40 de la tasa de ET de maíz a intervalos fijos y obtuvieron mayores rendimientos con el aumento de la cantidad de agua. Los resultados demuestran que el riego basado en la ETc puede ser uno de los esquemas de distribución eficientes del agua. Por su parte, en el mismo sentido El-Hendawy et al. (2008) estudiaron el efecto de distintos regímenes de riego (1,0; 0,80 y 0,60 de la ETc) sobre los componentes del rendimiento de maíz y encontraron que tanto el número de granos, como el peso, no se vieron afectados por el tratamiento de 0,80 de ETc, pero en cambio a 0,60 de ETc produjo los menores valores en ambas variables. La estrategia de aplicar agua de riego en cantidades menores a la ET, afectó de distinta manera el rendimiento y la EUA dependiendo de la etapa del cultivo en que se utilice (Musick y Dusek, 1980), según dichos autores esta estrategia debería limitarse a etapas tempranas de crecimiento durante la fase vegetativa, muy por delante de la floración. En tal sentido, sostienen que, proveer al cultivo de agua de riego, apreciablemente por debajo de la ET durante el PC, aumentaría el riesgo de una disminución significativa del rendimiento en maíz.

En un estudio realizado por Zwart y Bastiaanssen (2004) donde revisaron valores de EUA en la bibliografía a nivel mundial encontraron que el valor promedio para maíz se encuentra en 18 kg mm^{-1} y los valores de EUA mínimo y máximo de 11 y 27 kg mm^{-1} . Existen diversos factores que podrían contribuir a la explicación de dichos valores, entre los que los autores destacan el clima, el manejo del riego y el manejo del suelo y mencionan al RD como una alternativa para obtener los mayores niveles de EUA.

En referencia a la EUA de riego (EUAR) expresada como la relación del rendimiento de grano y el agua de riego aplicada, Farré y Faci (2009) obtuvieron que la EUAR fue significativamente mayor con riego total alrededor de la floración, respecto a RD. Según dichos autores el maíz bajo riego total alrededor de la floración fue capaz de producir más rendimiento por unidad de agua de riego aplicada que el maíz sujeto a RD entorno a la floración. Esto tiene importantes implicancias económicas, ya que bajo condiciones limitadas de agua el maíz irrigado completamente alrededor de la floración puede producir más rendimiento por unidad monetaria invertida en riego respecto a cultivos sujetos a RD entorno a la floración (Farré y Faci, 2009).

Para Payero et al. (2008) es importante la cuantificación de la respuesta local de los cultivos al riego para la gestión del mismo, y reportan valores de EUA de 15,3 y 13,7 kg mm⁻¹. La cual aumentó de forma no lineal con la ETc estacional, haciéndose máxima en valores de ETc entre 600 y 700 mm ha⁻¹ alcanzando una EUA cercana a los 16 kg mm⁻¹. El rendimiento mostró el mismo comportamiento, la EUA fue máxima y de 17 kg mm⁻¹ con rendimientos del entorno de 11.000 kg ha⁻¹. Los resultados muestran que la EUAR y EUA tuvieron un comportamiento opuesto.

También para Trout y Bausch (2012) el mantenimiento de la agricultura de riego requerirá de aumentos en la productividad del agua e indican que la productividad marginal del agua de riego (rendimiento adicional por unidad de agua adicional) aplicada tiende a ser baja cuando se trata de riego completo, y en la medida que el déficit de agua aumenta la mayor productividad marginal resulta de una mayor eficiencia de las aplicaciones de agua.

En el periodo reproductivo Bergonci et al. (2001) obtuvieron la mayor EUAR de 40 kg mm⁻¹ cuando el riego permitió mantener contenidos hídricos de 80 a 85% de la capacidad de campo del suelo. Ertek y Kara (2013) reportaron similares valores quienes consideran que la EUA es un parámetro importante para el programa de riego, y encontraron que se hizo máxima en tratamientos mantenidos a 70% de CC alcanzando EUA entre 31 y 48 kg mm⁻¹ evapotranspirado durante todo el ciclo. Estos autores consideran que la EUAR se incrementó a medida que disminuyó el consumo de agua del cultivo.

En un estudio sobre las distintas estrategias de programación de riego realizado por Steele et al., (1994) encontraron que cuando se dejó descender el nivel de agua un 40% por debajo de la capacidad de campo del cultivo se obtuvieron los mayores rendimientos; siendo también el tratamiento con mayor cantidad de agua aplicada durante todo el ciclo. Stegman (1982), obtuvo resultados similares y además comparó con un tratamiento en el cual mantuvo cercano a cero el potencial matricial del suelo; no observando diferencias significativas en cuanto a rendimiento cuando se dejó descender el nivel de agua hasta 30–40% por debajo de la capacidad de campo. Según Stegman (1982) el porcentaje de agua que se deja descender por debajo de capacidad de campo debe ser distinto para las diferentes etapas del cultivo, para que los rendimientos no se vean afectados. En este sentido, dicho autor menciona que reducciones de rendimiento menores de 5% de los niveles potenciales son probables, cuando el agotamiento de AD en la zona de la raíz está limitado a 60 a 70% en el período vegetativo temprano, 30 a 40% en el período comprendido entre 12 hojas hasta fijado de grano y 50 a 60% en el período de llenado del grano tardío. Una estrategia de manejo del agua de riego en maíz es regar cuando se ha agotado una determinada lámina de agua del suelo, es útil cuando se va a aplicar una lámina de riego fija en cada riego no importando el intervalo entre los riegos (intervalo variable). Esta estrategia, es la más conveniente desde el punto de vista del desarrollo óptimo del cultivo, pues el agua se aplica en las cantidades que puede almacenar el suelo y de acuerdo al consumo de la planta. No obstante, presenta el inconveniente que es necesario llevar un control de los niveles de humedad del suelo a fin de establecer con exactitud el momento del riego. Por otra parte, esta estrategia lleva a manejar intervalos de riego variables, ya que la velocidad de consumo de agua por la planta varía de acuerdo a la etapa de desarrollo y condiciones climáticas (Mendoza, 2013).

1.3.4.2. Riego deficitario en soja

El riego total se justifica económicamente cuando el agua para riego es fácilmente disponible y los costos locales del riego son bajos (James, 1988).

Por otra parte, el RD puede aumentar el rendimiento del cultivo en relación a condiciones de secano, evitando la falta de humedad en momentos críticos (Sweeney et al., 2003). Es una estrategia de riego que toma en cuenta las deficiencias hídricas para el cultivo y a su vez puede reducir la demanda evaporativa, haciendo así más eficiente el uso de los recursos hídricos (Kirda y Kanber, 1999). Los estudios en la programación del riego para soja han demostrado que evitar el riego durante las etapas vegetativas podría resultar en rendimientos altos, como los obtenidos si el cultivo fuera regado durante todo el ciclo (Specht et al. 1999, Elmore et al. 1988, Ashley y Ethridge 1978). Esto permitiría mejorar la EUAR, debido principalmente a ahorrar riegos durante las etapas vegetativas, en las que la evaporación del suelo es la causa principal de la pérdida de agua (Neyshabouri y Hatfield, 1986).

En soja se debe tener control sobre el riego, debido a que, al inicio de la etapa reproductiva, el exceso de agua puede provocar incrementos de altura y con ello producir vuelco, mientras que si el cultivo recibe agua en exceso al final de la etapa reproductiva se puede alargar el ciclo y perder calidad de grano (Carballo de Silva 1990).

En un trabajo que se comparó soja cultivada con riego y en secano, se concluyó que el aporte del riego, aun en pequeñas dosis, en momentos de estrés hídrico incide favorablemente sobre el rendimiento, el mismo fue 48% superior al testigo no regado (Zampedri y Currie, 2000). El RD de alta frecuencia y durante todo el ciclo constituye una clara alternativa, pero presenta algunas limitantes importantes, como no considerar que el déficit hídrico puede resultar más o menos trascendente en función del momento fenológico (Fabeiro y López Urrea, 2005). El RDC además considera las etapas de desarrollo y se basa en la idea de reducir los aportes de agua en aquellas etapas del ciclo en los que el déficit hídrico no afecta sensiblemente a la producción y calidad del grano y cubrir plenamente la demanda durante el resto del ciclo.

En soja se reportan valores de EUA de 5 a 11 kg mm⁻¹ (Vilche y Costanzo 2011, Della Maggiora et al. 2000). Por otra parte, García y García et al. (2010) encontraron diferencias en los regímenes de riego estudiados, en distintos GM de soja. En riego durante todo el ciclo se obtuvieron EUAR de 5,5 kg mm en el GM V y de 11,4 kg mm en el GM VI, a su vez con riego desde el inicio de floración se encontraron valores de 4,8 kg mm para el GM V y de 10,2 kg mm para el GM VI. Asimismo, se halló que había diferencias genotípicas con respecto a la EUA, estos resultados comprueban la importancia de la elección de cultivares como una estrategia clave para lograr rendimientos óptimos con menor uso de agua en el riego suplementario.

1.3.5. **Balance hídrico de suelos**

La utilización de estrategias de riego como el riego suplementario integral, el RD o el RDC requiere del monitoreo del agua en el suelo o de la estimación del contenido hídrico para la toma de decisiones de cuándo y cuánto regar. La programación y el cálculo de las necesidades de riego en base a los parámetros del suelo, como el contenido de humedad, presenta limitaciones, en tanto no se toman en cuenta otros parámetros del sistema suelo-planta-clima y requiere un monitoreo continuo en el tiempo. Por esta razón, como alternativa complementaria, y para el cálculo de necesidades de riego es de elevada utilización el modelo de balance hídrico (BH) de suelos que es un método preciso para calcular las necesidades de riego de un cultivo; y por otra parte integra aspectos de suelo-cultivo-clima (Sawchik 2012, Pereira et al. 2010, Allen et al. 1998, Pereira et al. 1995).

El concepto de BH a nivel de campo implica considerar las entradas y salidas de agua en un determinado volumen de suelo durante un periodo de tiempo (Hillel, 1998). De manera simplificada el BH se puede representar como:

Cambio en el almacenaje de agua en el suelo = Ganancias – Pérdidas o de manera más detallada: $\Delta S = (P + I + U) - (R + D + E + Tr)$

Dónde: ΔS , representa el cambio en el almacenaje de agua de suelo en la zona radicular; P, es la precipitación; I, representa la lámina de riego; U, representa el aporte positivo por ascenso capilar. Mientras que R, representa el escurrimiento; D,

el drenaje profundo fuera de la zona radicular; E, la evaporación desde la superficie del suelo y T, la transpiración por las plantas (Pereira et al., 2010).

En términos prácticos la magnitud de los componentes U, y D puede considerarse como insignificantes (Pereira et al., 2010). Entonces en condiciones de riego puede reformularse el BH de suelos como:

$$(\Delta S) = (P-R) + I - ETr$$

En donde $ETr = T + E$ y representa la ET del cultivo.

Entonces se puede a partir de la ecuación de BH determinar el requerimiento neto de riego, $Irn = \Sigma (ET - Pef.) - Wb$

Donde Irn , es el requerimiento neto de riego para un periodo de tiempo dado; ET, puede ser expresada como ETc ; Pef , es la precipitación efectiva, a los efectos prácticos la diferencia entre la PP y el escurrimiento y Wb , es el agua almacenada al principio del periodo para satisfacer los requerimientos de ET (Sawchik 2012, Pereira et al. 2010).

1.3.6. **Modelo de simulación Aquacrop de FAO**

El modelo de simulación AquaCrop posee como característica principal que es impulsado por el agua, requiere un bajo número de datos de entrada para simular la respuesta en biomasa y rendimiento a diferentes disponibilidades hídricas en la mayoría de los cultivos. Los aspectos que distinguen a Aquacrop de otros modelos de crecimiento y producción de cultivos además de utilizar un número limitado de parámetros y hacer foco en el agua, es que usa como parámetro principal la cobertura del suelo por el canopeo (CC) en lugar del IAF, y utiliza la productividad del agua (WP) normalizada por la ET_0 y por la concentración de CO_2 , esto le confiere al modelo una capacidad de extrapolación amplia a diversos lugares. Por otra parte, aunque el modelo es relativamente simple, presta especial atención a los procesos fundamentales que intervienen en la productividad de los cultivos y en sus respuestas al déficit de agua, tanto desde el punto de vista fisiológico como agronómico (Steduto et al., 2009).

1.3.6.1. Marco conceptual

La radiación solar interceptada es la energía que utilizan los procesos de transpiración (Tr) y de fotosíntesis. Por tanto, existe una relación directa entre la biomasa (B) producida y el agua consumida por los cultivos. Las deficiencias hídricas y la disminución de la Tr de los cultivos tienen como resultado una reducción en la producción de B y de rendimiento. El modelo AquaCrop separa la evaporación (E) del suelo no productiva de la Tr y estima la producción de B directamente a partir de la Tr del cultivo mediante la WP. La siguiente ecuación es fundamental para el motor de crecimiento de AquaCrop, $B = WP \times \Sigma Tr$. La WP cuando se normaliza por la demanda evaporativa, se comporta de forma conservativa (Steduto et al, 2007). Es decir, que la WP normalizada (WP*) se mantiene prácticamente constante en diversos ambientes. Esto tiene implicancias cruciales para la solidez del modelo, la cual se ve reforzada por el cálculo del IC diario durante el período de formación del rendimiento (Y). Por otra parte, en los cultivos solo una parte de la B se destina a los órganos cosechables para producir Y, y la relación entre el Y la B es el índice de cosecha (IC), por tanto, se estima el rendimiento en Aquacrop de la siguiente manera $Y = B \times IC$ (Steduto et al., 2012).

1.3.6.2. Estructura y componentes

AquaCrop es un modelo dinámico que simula el rendimiento de los cultivos como una función del consumo de agua. Los datos necesarios son las características del clima, del suelo y del manejo del cultivo (Raes et al., 2009).

Clima. El ambiente atmosférico se identifica por cuatro variables meteorológicas diarias: T máximas y mínimas, PP y demanda evaporativa atmosférica, expresada como la evapotranspiración de referencia (ET_o), la cual se calcula de acuerdo a la ecuación de FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998). Además, se requiere la concentración media anual de CO₂ de la atmósfera. Las PP, el riego y la ET_o, son los aspectos determinantes del balance de agua en la zona radicular y del estrés hídrico. La concentración atmosférica de CO₂ incide en la WP, la expansión del canopeo y la conductancia estomática. Sin tener en cuenta su aumento constante a través de los

años, la concentración atmosférica de CO₂ varía con un ciclo anual y también según la ubicación. Estas fluctuaciones son menores y de poca importancia si se considera su impacto en los cultivos (Steduto et al., 2012).

Cultivo. El cultivo en el modelo incluye los siguientes subcomponentes: fenología, desarrollo del canopeo, profundidad de raíces, Tr, E del suelo y producción de B. AquaCrop utiliza los grados día acumulados (GDD) como el reloj interno predeterminado para tener en cuenta los efectos de los regímenes de T en la fenología. No obstante, la simulación se ejecuta y se muestra en intervalos diarios.

Desarrollo del canopeo. La CC más exactamente la CC verde, es una característica crucial del AquaCrop, la expansión, el envejecimiento y la senescencia del canopeo, junto con su conductancia estomática determinan la cantidad de agua transpirada, lo que a su vez establece la cantidad de B producida. Expresar la cantidad de follaje en términos de CC (en fracción o porcentaje) es una de las características particulares del AquaCrop (Steduto et al., 2012). En la primera mitad del incremento de CC, se utiliza una ecuación exponencial para la simulación, análoga a la ecuación del porcentaje de crecimiento relativo, específicamente, $CC = CC_0 \times e^{CGC \cdot t}$, donde CC es la fracción de suelo cubierta por el canopeo en el tiempo t, CC₀ es la CC inicial (cuando t=0), también en porcentaje y CGC es el coeficiente de crecimiento del canopeo en porcentaje de la CC existente cuando el tiempo es igual a t. La CC₀ se define como el tamaño del canopeo del promedio de las plántulas al 90% de emergencia multiplicado por la densidad de plantas. A medida que el cultivo se aproxima a la maduración, la CC entra en una fase decreciente como consecuencia de la senescencia foliar. La disminución de la CC verde en AquaCrop está caracterizada por un coeficiente de disminución del canopeo (CDC), con unidades de reducción fraccionaria de la CC por unidad de tiempo, y se puede ajustar de modo que se amplíe o reduzca el intervalo de tiempo requerido para abarcar desde el inicio de la senescencia hasta el momento en que desaparezca por completo, CC=0. El punto de inicio de la senescencia del canopeo es crucial porque determina la duración de la cobertura en el momento en que es más efectivo en cuanto a la fotosíntesis. A

medida que inicia la senescencia, tanto la Tr como la fotosíntesis disminuyen y la acumulación de B se reduce (Steduto et al., 2012).

Profundización de las raíces. La absorción de agua por las raíces en AquaCrop se simula definiendo la profundidad efectiva de las raíces (Ze). La Ze en el momento de la siembra hasta el punto previo a la emergencia corresponde a la profundidad del suelo en la cual la semilla en germinación puede extraer agua. El modelo simula la tasa de profundización con una función exponencial que hace que la profundización de la zona radicular después de la siembra sea más rápida en una etapa inicial. En caso de que, a una profundidad determinada, una capa del suelo limite el crecimiento de las raíces, éstas continuarán avanzando a un ritmo normal hasta alcanzar la capa restrictiva y luego se detendrán por completo. La extracción de agua por parte de las raíces sigue el patrón común utilizado en las simulaciones, es decir el 40%, 30%, 20% y 10%, del agua requerida se absorbe desde el cuarto superior al cuarto inferior de Ze , cuando el contenido de agua es suficiente (Steduto et al., 2012).

Transpiración del cultivo. La Tr por unidad de superficie del suelo, depende de la fracción de la superficie del suelo ocupada por el canopeo cuando no hay estrés suficiente para limitar la apertura estomática. La Tr se calcula a partir de la ETo con el coeficiente de transpiración del cultivo, simbolizado como Kcb , definido como el coeficiente de cultivo para transpiración cuando el canopeo cubre por completo el terreno $CC=1$ (Steduto et al., 2009).

Evaporación del suelo. La E se produce desde la superficie humedecida del suelo que no está protegida por la sombra del canopeo. AquaCrop calcula de manera separada la E del suelo y la Tr ; y para simplificar, asume que la E tiene lugar sólo desde el suelo no sombreado y que es ligeramente inferior al valor proporcional a $(1-CC)$, según los resultados del ajuste de la advección entre hileras. El otro factor clave que determina la E es la humedad de la capa superficial del suelo. Cuando la superficie del suelo está completamente humedecida, la E aumenta según la tasa potencial determinada por el suministro de energía, y es aproximadamente un 10% mayor que la tasa de ETo .

Producción de biomasa. La WP es fundamental para el funcionamiento de AquaCrop y ha mostrado un comportamiento notablemente conservativo cuando se normaliza

para diferentes demandas evaporativas. El parámetro de WP introducido en AquaCrop se normaliza por la ETo, y para la concentración de CO₂ en la atmósfera. Se comprobó que la WP normalizada para B, (WP*) es casi constante para un cultivo cuando los nutrientes no son limitantes, independientemente del estrés hídrico, salvo en casos extremadamente graves. La calibración de la WP y la normalización por la ETo se basaron en la ecuación: $WP^* = \{B / \sum Tr / ETo\} [CO_2]$. La WP difiere entre cultivos. El valor de WP*, es empleado para el ciclo completo en la mayoría de los cultivos. Sin embargo, los cultivos que presentan granos con alto contenido de aceite y proteínas requieren más asimilados fotosintéticos o energía por unidad de materia seca generada, después de la floración y durante la etapa de llenado de grano, para esos cultivos, AquaCrop utiliza un valor único para la WP* hasta la floración y luego disminuye gradualmente hacia un valor de WP* más bajo en respuesta a la composición del grano (Steduto et al., 2012).

Parámetros de cultivo

Aunque están sustentados por procesos biofísicos fundamentales y complejos, AquaCrop usa un número relativamente pequeño de parámetros de cultivo. Los parámetros se clasifican en dos categorías: conservativos o varietales y dependientes de las condiciones. Los parámetros conservativos de cultivo no cambian con el tiempo, las prácticas de manejo, el clima, ni la ubicación geográfica. La decisión de asignar un parámetro particular a la categoría conservativa está basada en análisis teóricos y conceptuales, y en datos empíricos extensos que demuestran que son casi constantes. En principio, los parámetros conservativos no requieren ajustes a las condiciones locales o para las variedades, y se pueden usar tal cual en las simulaciones. Los parámetros de cultivo dependientes de las condiciones locales, se sabe que varían normalmente dependiendo de las situaciones de producción y material genético utilizado (Steduto et al., 2012).

Parámetros conservativos

Desarrollo y crecimiento del cultivo

- Temperatura base y temperatura superior para grados día en aumento

- Cobertura del canopeo promedio de las plántulas al 90 % de emergencia (cco)
 - Coeficiente de crecimiento del canopeo (CGC); Coeficiente de disminución del canopeo (CDC)
 - Grado de determinación del cultivo vinculada/no vinculada con la floración
- Transpiración del cultivo
- Disminución del coeficiente de cultivo como resultado del envejecimiento
- Producción de biomasa y formación de fruto
- Productividad del agua normalizada por ETo y CO₂ (WP*)
 - Coeficiente de reducción que describe el efecto de los productos sintetizados durante la formación del grano en la productividad del agua normalizada
 - Índice de cosecha de referencia (ICo)
- Estrés hídrico
- Umbrales superior e inferior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del canopeo y forma de la curva de estrés
 - Umbral superior del agotamiento de humedad del suelo para cierre estomático y forma de la curva de estrés
 - Umbral superior del agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana y forma de la curva de estrés
 - Umbral superior del agotamiento de humedad del suelo para fallo de la polinización y forma de la curva de estrés
 - Posible incremento del IC a causa del estrés hídrico antes de la floración
 - Coeficiente que describe el impacto positivo sobre el IC del crecimiento vegetativo restringido durante la formación del fruto
 - Coeficiente que describe el impacto negativo sobre el IC del cierre estomático durante la formación del grano
 - Incremento máximo permisible del IC especificado
 - Punto anaerobiótico (para los efectos del encharcamiento sobre la Tr)
- Estrés por temperatura
- Temperaturas mínima y máxima del aire por debajo de las cuales la polinización empieza a fallar
 - Grados día mínimos requeridos para la producción completa de biomasa

Parámetros no conservativos

Fenología

- Duración etapa emergencia-floración y comienzo de la formación del grano
- Duración de la etapa de floración
- Tiempo para empezar la senescencia del canopeo
- Duración del ciclo total de cultivo

Manejo de cultivo

- Densidad de plantas
- Tiempo para el 90% de emergencia
- Cobertura del canopeo

Características del suelo

- Profundidad máxima de raíces
- Tiempo para alcanzar la profundidad máxima de raíces

Dependientes del suelo y del manejo

- Respuesta a la fertilidad del suelo
- Estrés por salinidad del suelo

Suelo. En AquaCrop, el suelo se describe mediante un perfil y las características de la capa freática, en caso de que exista. El suelo se puede subdividir en dirección vertical hasta en cinco horizontes de profundidad variable, en donde cada horizonte se ajusta a diferentes características físicas: el contenido de humedad en el punto de saturación, el límite superior de contenido de agua por gravedad denominado capacidad de campo el límite inferior de contenido de agua donde un cultivo puede alcanzar el punto de marchitez permanente y la conductividad hidráulica en el punto de saturación (K_{sat}). Con base en estas características, AquaCrop deriva otros parámetros que rigen la E del suelo, el drenaje interno y la percolación profunda, la escorrentía superficial y el ascenso capilar. A través del seguimiento de los flujos de agua de entrada (PP, riego y ascenso capilar) y salida (escorrentía, evapotranspiración y percolación profunda) en los límites de la zona radicular, se puede calcular en cualquier momento de la estación la cantidad de agua retenida en la zona radicular. Cuando se calcula el balance de agua en el suelo, la cantidad de

agua almacenada en la zona radicular se puede expresar como una lámina de agua equivalente o como el agotamiento en la zona radicular (D_r) (Steduto et al., 2012).

Manejo. Riego. Las opciones de riego incluyen la selección de los métodos de aplicación del agua (aspersión, superficial o goteo) definiendo el calendario en términos de tiempo, profundidad y calidad del agua de riego para cada aplicación, o permitiendo que el modelo genere automáticamente el calendario basado en un intervalo de tiempo fijo, profundidad fija por aplicación, o porcentaje fijo de agotamiento de agua permisible.

Campo. Aquí se consideran tres aspectos: (i) fertilidad del suelo para que el crecimiento del cultivo sea con o sin fertilización; (ii) cobertura del suelo para reducir la E. Los efectos de la fertilidad en el crecimiento y la productividad del cultivo no se simulan directamente. (Steduto et al., 2012).

2. PRODUCCIÓN DE MAÍZ CON ESTRÉS HÍDRICO PROVOCADO EN DIFERENTES ETAPAS DE DESARROLLO¹

Giménez L.*

* Departamento de Producción Vegetal. Estación Experimental Mario A. Cassinoni. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Ruta 3, km 363, 60000 Paysandú, Uruguay. Correo electrónico: kapoexe@fagro.edu.uy

2.1. RESUMEN

El maíz es un cultivo de elevado potencial en producción de grano y es altamente sensible a las deficiencias ambientales.

La disponibilidad hídrica es la principal limitante del ambiente que presenta Uruguay para el desarrollo de maíz, debido a la baja capacidad de almacenamiento de agua de los suelos, las elevadas demandas atmosféricas y la irregularidad de las precipitaciones (PP).

El trabajo consistió en determinar los rendimientos de maíz en situaciones de bienestar hídrico (T1) y cuantificar las disminuciones de rendimiento generadas por la ocurrencia de estrés hídrico durante: el periodo crítico (PC) (T2), el llenado de grano (T3), la etapa vegetativa y el PC (T4); además se evaluó un tratamiento en secano (T5).

El estrés hídrico en distintas etapas se generó a través de simuladores de sequía y el bienestar hídrico por medio de riego suplementario.

Los resultados mostraron que el rendimiento sin deficiencias hídricas se ubicó entre 13,5 y 15,3 t ha⁻¹ aproximadamente. Las deficiencias de agua durante el PC provocaron pérdidas de rendimiento aproximadas al 50% del potencial. El estrés hídrico en el llenado de grano generó disminuciones del rendimiento cercanas a 30% y las deficiencias acumuladas en la etapa vegetativa y el PC provocaron un descenso del rendimiento de 56%.

¹ Publicado: Agrocencia (Uruguay). 2012. 16 (2): 92-102.

2.2. SUMMARY

Corn is a crop of high potential for grain production and it is also highly sensitive to environmental deficiencies. Water availability is the main environmental limiting factor that Uruguay presents to corn development, due to low water storage capacity of the soil, high atmospheric demands and irregular rainfall. The work consisted in determining the yields of corn in situations of water wellness (T1), and quantify the decreases generated by the occurrence of water stress during: the critical period (CP) (T2), grain filling (T3), and vegetative stage and CP (T4); it was also evaluated a witness in rainfed (T5). Water stress was generated at various stages through drought simulators and water wellness by supplementary irrigation.

The results showed that the yield without water deficiencies was between 13,5 and 15,3 t ha⁻¹ approximately. Water deficiencies during CP caused losses of approximately 50% of the potential yield. Water stress at grain filling caused generated yield reductions close to 30%, and the deficiencies accumulated in the vegetative stage and CP caused a decline of 56%.

2.3. INTRODUCCIÓN

El maíz es una gramínea de tipo fotosintético C4 con elevados potenciales de producción de biomasa y rendimiento. A su vez posee altas exigencias en el ambiente de producción y en la tecnología aplicada (Andrade, et al., 1996).

El rendimiento promedio obtenido de maíz en condiciones de secano presenta una brecha muy amplia en relación al logrado con riego suplementario (Sawchik y Formoso, 2000; Cardellino y Baethgen, 2000).

Este comportamiento se explica porque la principal limitante ambiental del Uruguay para la producción de cultivos de verano es la disponibilidad hídrica (Sawchik y Ceretta, 2005), debido a la escasa capacidad de almacenamiento de agua de los suelos (Molfino y Califra, 2001), a las demandas atmosféricas elevadas del verano (Baethgen y Terra, 2010) y a la irregularidad de las precipitaciones, que generalmente no cubren las necesidades de los cultivos.

El riego es la tecnología que permite levantar la limitante ambiental de mayor importancia para la producción de maíz, sin embargo, es utilizado escasamente por

diferentes motivos, entre los que se destacan las inversiones y los costos operativos para desarrollar cultivos con riego.

Diferentes trabajos han evaluado la respuesta al riego en maíz utilizando como criterio de manejo del agua cubrir la evapotranspiración del cultivo (ET_c) durante la totalidad del ciclo (Cardellino y Baethgen, 2000; Sawchik y Formoso, 2000). Esta estrategia permite que el cultivo transpire en su máximo potencial y logre los mayores rendimientos posibles.

Sin embargo, el enfoque de aplicar riego satisfaciendo el total de las necesidades del cultivo es cada vez más cuestionado a nivel mundial, debido al volumen de agua requerido, a los efectos negativos que pueden tener los excesos hídricos sobre el medio ambiente (Feres y Soriano, 2007) y a los costos elevados que implica este manejo del agua.

Existen estrategias alternativas que mejoran la eficiencia de uso del agua, como el RDC (Feres y Soriano, 2007). Este utiliza como criterio la disminución de los volúmenes de agua aplicados y considera la importancia diferencial de las etapas fenológicas en la concreción del rendimiento. En esta estrategia se priorizan las aplicaciones de agua en los PC (English *et al.*, 1990).

En maíz las deficiencias hídricas causan efectos diferenciales en el rendimiento de acuerdo a la intensidad y etapa del ciclo en que se produzcan (Claassen y Shaw, 1970).

Los efectos del estrés hídrico en la etapa vegetativa de maíz fueron evaluados por Çakir (2004) durante tres años. Obtuvo reducciones en la biomasa de 28 a 32%, pero no constató mayores diferencias en el rendimiento con el testigo regado durante todo el ciclo.

Durante el desarrollo reproductivo el estrés hídrico reduce el número de granos debido a caídas en las tasas de fotosíntesis y en el flujo de asimilados a los órganos en desarrollo (Schussler y Westgate, 1995).

Se destaca la sensibilidad del maíz a limitantes en la disponibilidad hídrica en el entorno de la floración (Otegui *et al.*, 1995), ya que durante esa etapa se fija el número de granos por superficie, que es el componente principal del rendimiento. Asimismo, las deficiencias hídricas en la floración incrementan la asincronía entre la

liberación de polen y la emergencia de los estigmas, esto provoca fallas en la polinización (Hall et al., 1982). Para lograr un número de granos por superficie elevado se requieren altas tasas de crecimiento del cultivo durante el entorno de la floración (Andrade et al., 2000) y para ello, entre otros factores, es determinante el estado hídrico del cultivo en dicha etapa. Las deficiencias hídricas en la fase de llenado de grano tienen menor influencia sobre el rendimiento debido a que no afectan el número de granos por superficie, sino que influyen principalmente sobre el peso de grano.

NeSimith y Ritchie (1992), trabajando con deficiencias hídricas durante el llenado de grano, obtuvieron reducciones en la biomasa producida de 23 a 36% y del rendimiento de 21 a 40% en relación al testigo sin deficiencias. Estos autores concluyen que la importancia del estrés hídrico sobre el rendimiento en esta etapa depende de cuan temprano ocurra el mismo. En el caso de que las deficiencias ocurran en las primeras etapas del llenado de grano (fase lag) los efectos depresivos son mayores, ya que se afecta el número de granos fijados.

Para una correcta evaluación de posibles estrategias de manejo del agua de riego en maíz se deben conocer los efectos que provocan las deficiencias hídricas sobre el rendimiento en las distintas etapas de desarrollo del cultivo. Cabe indicar que el tema no ha sido estudiado en las condiciones agro-climáticas del país.

El objetivo del trabajo fue determinar el rendimiento de maíz en situaciones de bienestar hídrico y cuantificar las disminuciones que se generan por la ocurrencia de estrés hídrico en las principales etapas de desarrollo.

2.4. 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 el Departamento de Paysandú a 32° 22' S y 58° 03' W, durante los años agrícolas 2009/10 y 2010/11.

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

Fray Bentos y a la unidad San Manuel en la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (escala 1:1000.000) (Altamirano *et al.*, 1976).

El análisis químico realizado en 2009 indicó que poseía 1,91% de C orgánico, 8 ppm de N-NO₃ y 10 ppm de P Bray 1. En 2010 el análisis mostró un resultado de 6 ppm de N-NO₃ y 20 ppm de P Bray 1.

Los ensayos fueron fertilizados en 2009 con 300 kg ha⁻¹ de N aplicados en el estadio V6, usando como fuente urea (46-0-0), la fertilización fosfatada se realizó con 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y la fuente fue superfosfato triple de calcio (0-46-46- 0) aplicado previo al laboreo. En 2010 se fertilizó sólo con N en la misma dosis, momento y fuente que el año anterior.

El laboreo realizado en ambos ensayos fue de tipo convencional y se realizó con rastra excéntrica y rastra de dientes.

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

Cuadro 1. Parámetros hídricos y físicos del suelo

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	235	150	1,34	85
A-B	0-70	289	178		111

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

Las siembras fueron realizadas con una sembradora experimental (Wintersteiger PLOTMAN, Gesellschaft m.b.n. and O, Austria), el 22 y el 27 de octubre de 2009 y de 2010, respectivamente.

El material genético utilizado fue el híbrido DK 692 de ciclo intermedio.

Las parcelas estuvieron compuestas por cinco surcos de 5 m de longitud y una distancia entre hileras de 0,7 m. La población objetivo fue de 100.000 plantas ha⁻¹ y se logró en forma ajustada. El control de malezas se realizó con el herbicida Atrazina a dosis de 2 Lha⁻¹ pc, la aplicación se hizo antes de la siembra y fue incorporada con el laboreo.

Los tratamientos (Ts) 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 2009-10 el PC se ubicó entre el 23/12 y 22/01 y en 2010-11 entre el 18/12 y 17/01.

T3= Deficiencias hídricas en el llenado de grano, definido como la etapa entre la finalización del PC y la madurez fisiológica. En 2009-10 la ubicación fue entre 23/01 y 27/02 y en 2010-11 entre 18/01 y 25/02.

T4= Deficiencias hídricas durante la fase vegetativa y durante el PC, esta etapa se ubicó desde la emergencia del cultivo, la cual ocurrió 7 y 10 días posteriores a la siembra (en 2009 y 2010 respectivamente) y la finalización del PC.

T5= Secano, sin riego y sin intercepción de PP.

En el primer año del estudio el T4 se perdió debido a las características climáticas que impidieron interceptar las PP durante la etapa vegetativa.

Los T1, T2, T3 y T4 de los ensayos fueron generados mediante dos tipos de intervenciones en la disponibilidad hídrica: a) riego suplementario y b) colocación de simuladores de sequía durante los eventos de PP con el objetivo de impedir el ingreso de agua de lluvia en los Ts definidos con deficiencias hídricas.

Los simuladores de sequía fueron contruidos con estructuras de acero y cubiertos de lona impermeable. Las dimensiones fueron de: 3,5 m x 5 m x 2,5 m de altura máxima, con techos a dos aguas, dos paredes laterales, una frontal y una trasera. Las parcelas estuvieron limitadas por una ronda de tierra de 0,2 m de altura con el objetivo de impedir el ingreso de aguas de escurrimiento. Se construyeron desagües para evacuar el agua de lluvia proveniente de los techos.

El riego se realizó por un sistema de goteo, con cintas con goteros cada 0,2 m y con un caudal por gotero de 1,49 L h⁻¹. El riego se aplicó en los Ts con deficiencias hídricas y de acuerdo a la variación del agua disponible (AD), la cual fue estimada a través de un balance hídrico de suelos de paso diario. Las variaciones del contenido de agua en el suelo fueron calculadas mediante la expresión: $\Delta S = PP + R - ET_c$, siendo: ΔS = variación de AD (mm), R= riego (mm). La ET_c (mm), fue calculada diariamente de la siguiente manera $ET_c = ET_o \times K_c$, siendo ET_o 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 ETo fueron medidos a través de una estación meteorológica automática Vantage Pro 2TM, modelo 6510 (Davis Instruments, Hayward, CA), ubicada en la EEMAC.

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

En el Cuadro 2 se muestran las PP totales durante los ciclos, el riego agregado y el número de eventos y PP interceptadas por los simuladores, para cada tratamiento y en cada año de estudio.

Cuadro 2. Número de riegos, riego aplicado en mm, precipitación en mm, número de eventos interceptados y precipitación interceptada en mm por tratamiento.

Temporadas 2009-10 y 2010-11

	Número de riegos		Riego aplicado (mm)		Precipitaciones (mm)		Número de eventos interceptados		Precipitaciones interceptadas (mm)	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Temp. Trat.										
T1	6	16	165	473	1549	442	0	0	0	0
T2	1	9	33	264	1378	433	5	2	171	9
T3	4	13	110	363	1104	365	7	1	445	77
T4		5		143		412		3		30
T5	0	0	0	0	1549	442	0	0	0	0

Se determinó el contenido hídrico del suelo mediante un equipo de sonda de neutrones CPN modelo 503DR HIDROPROBE.

Previamente a la utilización de la sonda en los ensayos, se construyó una curva de calibración para el suelo del campo experimental. Para ello se midió el contenido de humedad del suelo a través del método gravimétrico y se realizaron las lecturas en las mismas profundidades con la sonda de neutrones, obteniendo una curva de calibración del equipo ajustada con $r^2 = 0,95$.

Las mediciones de humedad se realizaron cada 0,1 m y los tubos de acceso poseían 1 m de longitud. En 2009-10 las fechas en las que se realizaron las mediciones de agua fueron: 31/12, 8/1, 14/1, 17/1, 20/1, 24/1, 30/1, 8/2 y 17/2. En 2010-11 fueron realizadas en las siguientes fechas: 25/10, 10/11, 15/11, 19/11, 24/11, 29/11, 3/12, 9/12, 13/12, 21/12, 27/12, 30/12, 8/1, 12/1, 21/1, 28/1 y 22/2.

Se efectuaron cuatro muestreos de biomasa de la parte aérea coincidiendo aproximadamente con los estadios de: inicios 29/12/09 y 20/12/10 (muestreo 1); mediados 9/1/10 y 4/1/11 (muestreo 2) y final del PC 26/1/10 y 21/1/11 (muestreo 3) y cosecha 2/3/10 y 28/2/11 (muestreo 4). En cada muestreo se cortó 1 m lineal de plantas a 3 cm del suelo, las que fueron pesadas frescas en laboratorio y una sub-muestra se secó en estufa a temperaturas de 40 a 60 °C hasta obtener peso constante.

Las cosechas de los ensayos fueron realizadas el 2/3/10 y el 28/2/11. En la superficie de cosecha se determinó el número de plantas m^{-1} , el número de espigas por planta, el número de granos por espiga con esa información se calculó el número de granos m^{-2} y se midió el peso promedio de grano.

El diseño experimental fue bloques completamente aleatorizados, ajustándose el modelo

$Y_{ij} = \mu + t_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$ donde: μ es la media general, t 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, número de granos por m^2 , peso promedio de granos y biomasa de la parte aérea.

Se realizaron contrastes ortogonales para comparar el comportamiento de los tratamientos evaluados, se utilizó en todos los casos un nivel de significación del 5%. Los análisis fueron realizados mediante el paquete estadístico SAS v.9.2.

2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las condiciones climáticas en los dos años estudiados fueron contrastantes, el año 2009-10 (año “Niño”) estuvo caracterizado por precipitaciones abundantes durante el ciclo del cultivo (Figura 1) y un número importante de días nublados (32), como consecuencia la radiación solar incidente acumulada fue baja (Figura 2). En cambio, en 2010-11 (año “Niña”) las precipitaciones entre noviembre y enero (fines) fueron significativamente inferiores al promedio y a su vez la radiación solar diaria entre noviembre y febrero fue elevada, en este caso 13% superior al mismo periodo del año anterior.

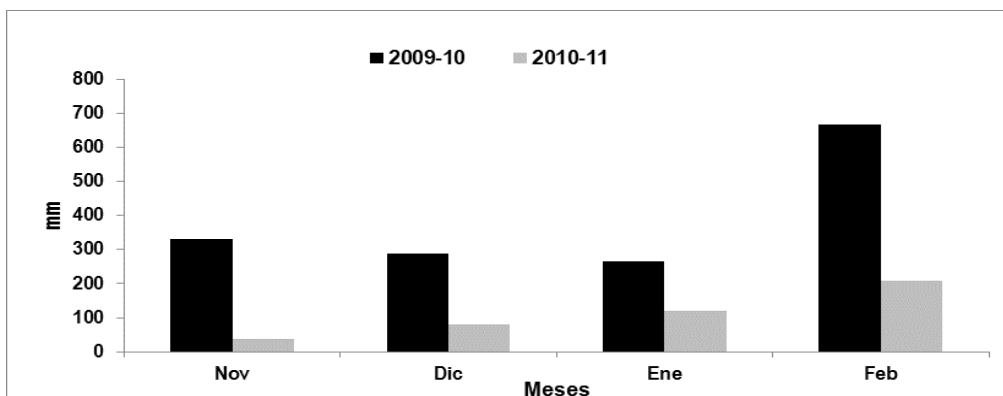


Figura 1. Precipitaciones mensuales en mm. Temporadas 2009-10 y 2010-11

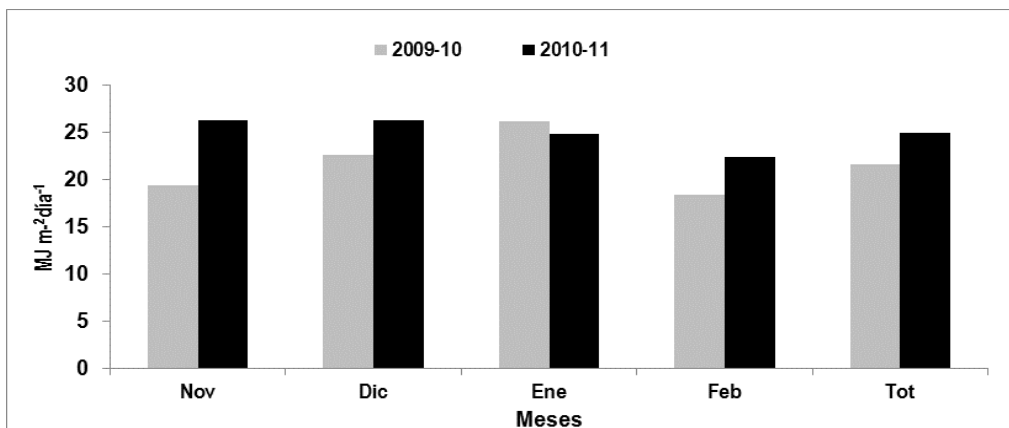


Figura 2. Radiación solar incidente diaria promedio ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)

2.5.1. Evolución del agua en el suelo

En la Figura 3 se muestra la evolución del contenido hídrico del suelo, en algunas fechas seleccionadas, para los diferentes Ts evaluados en los años estudiados.

Se constató en los T1 una menor dispersión entre las medidas efectuadas del contenido hídrico de suelo en comparación con los restantes Ts evaluados (Figura 3). En los Ts con estrés hídrico generado el contenido más bajo de agua en el suelo se midió durante las etapas en que fueron inducidas las deficiencias.

En los T5 se visualizó en el año 2009-10 una menor dispersión entre las medidas del contenido hídrico del suelo en la mayoría de las profundidades analizadas en comparación con el mismo tratamiento en 2010-11. El comportamiento se debió a que el exceso de precipitaciones ocurrido en 2009-10 provocó un contenido elevado de agua en el suelo durante la mayor parte del ciclo. En cambio, en 2010-11, las precipitaciones fueron escasas y variables entre las diferentes etapas de desarrollo.

2.5.2. Consumo estimado de agua

Se muestra en el Cuadro 3 el consumo estimado de agua durante el ciclo y las etapas de desarrollo, en los diferentes Ts evaluados. Se observa en los T1 que en el año 2009-10 el consumo de agua fue menor en 25% aproximadamente que en el año 2010-11, este comportamiento se debió a las menores ETc que ocurren en los años “Niño” dado el elevado número de días nublados y con precipitaciones. En los T1 el mayor consumo de agua ocurre durante el PC, no obstante, fue la etapa de menor duración (30 días). En siembras de octubre el PC se ubica durante los meses de diciembre y enero, en los que ocurren las mayores ETc, esto justifica el elevado consumo de agua en la etapa.

Cuadro 3. Estimación del consumo de agua en mm en las etapas de desarrollo y en el ciclo total por tratamiento

Temporadas	Etapa vegetativa		Período crítico		Llenado de grano		Ciclo	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Tratamientos								
T1	133	164	185	225	148	216	466	605
T2	134	162	100	56	136	208	370	426
T3	134	161	177	225	83	147	394	533
T4		69		55		209		333
T5	126	72	162	53	124	151	412	276

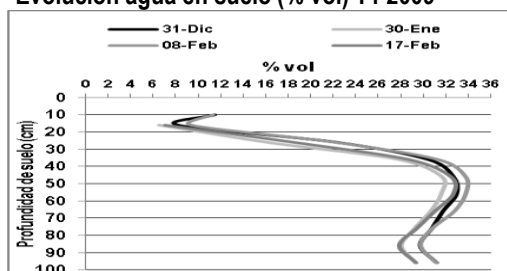
El llenado de grano fue la etapa que continuó en consumo de agua al PC, debido a que se ubicó temporalmente entre fines de enero y febrero, con valores de radiación solar y temperaturas menores que en el PC, no obstante, la duración fue mayor (39 - 41 días).

La etapa que presentó menor consumo de agua fue la vegetativa, dado que las ETc fueron más bajas que en las etapas anteriormente analizadas y la duración fue similar a la de llenado de grano (42 – 43 días).

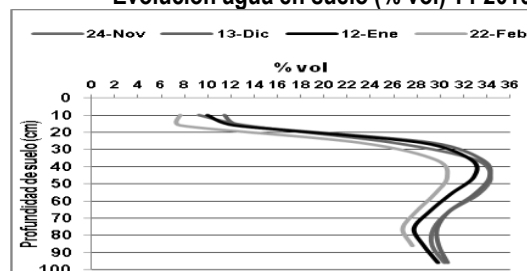
En los Ts 2, 3 y 4 con estrés hídrico generado, las relaciones de consumo de agua entre las etapas variaron de acuerdo al tratamiento.

En los T5 se observó gran variación en el consumo de agua entre años, esto se justifica por las diferentes disponibilidades hídricas que presentó el tratamiento en los años estudiados.

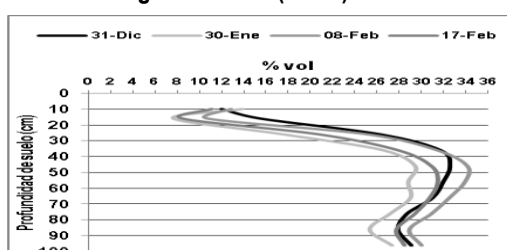
Evolución agua en suelo (% vol) T1 2009



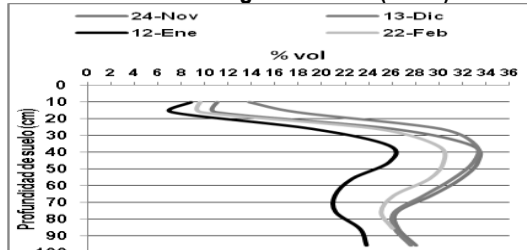
Evolución agua en suelo (% vol) T1 2010



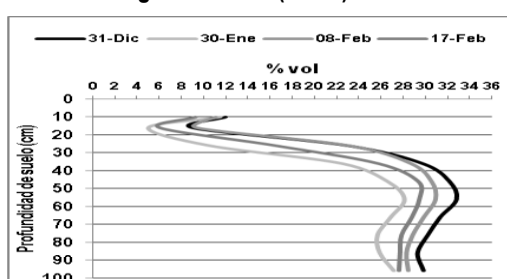
Evolución agua en suelo (% vol) T2 2009



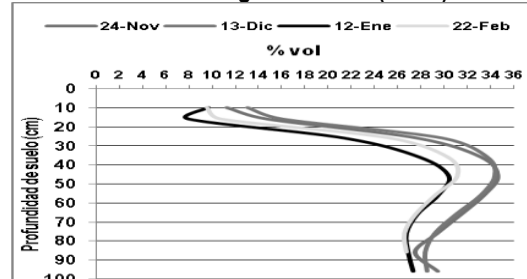
Evolución agua en suelo (% vol) T2 2010



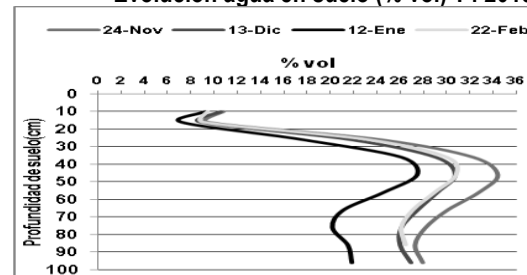
Evolución agua en suelo (% vol) T3 2009



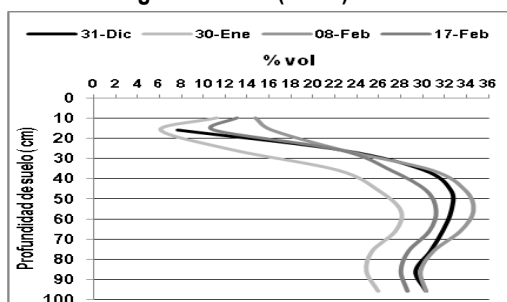
Evolución agua en suelo (% vol) T3 2010



Evolución agua en suelo (% vol) T4 2010



Evolución agua en suelo (% vol) T5 2009



Evolución agua en suelo (% vol) T5 2010

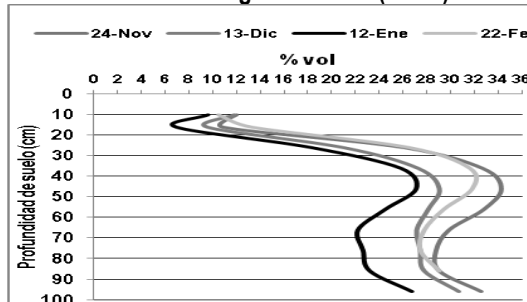


Figura 3. Evolución del agua en el suelo (% vol)

2.5.3. Producción de biomasa

En las Figuras 4 y 5, se muestra la evolución de la deposición de la materia seca (MS) aérea para los Ts evaluados en los años 2009-10 y 2010-11, respectivamente.

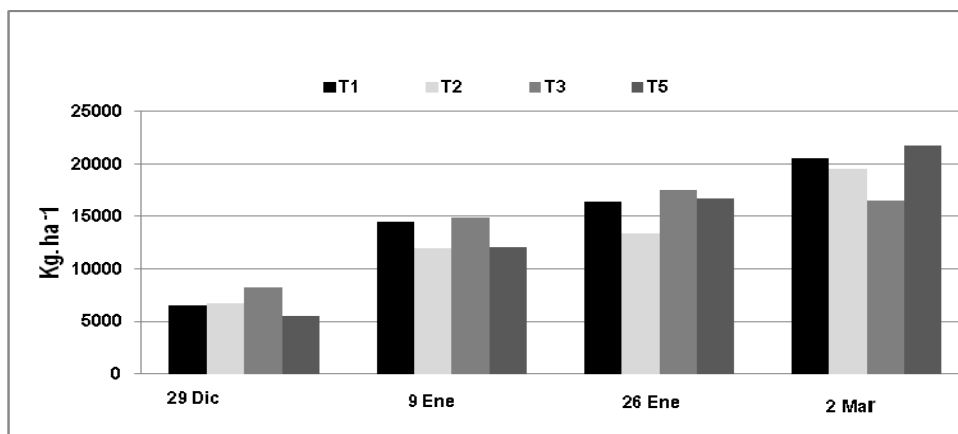


Figura 4. Evolución de la MS (k ha⁻¹) por tratamiento. Temporada 2009-10

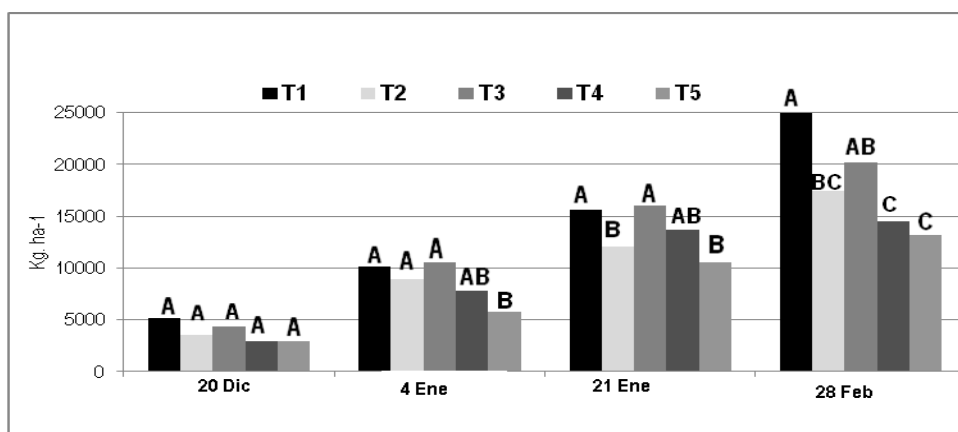


Figura 5. Evolución de la MS (k ha⁻¹) por tratamiento. Temporada 2010-11

Las características climáticas de 2009-10 redujeron la radiación solar incidente y provocaron que el T1 presentara limitaciones para expresar el potencial de producción de biomasa. Por el contrario, 2010-11 presentó una elevada radiación incidente, la cual generó condiciones para que el T1 mostrara una elevada deposición de biomasa.

Andrade et al. (1996) señalan que el crecimiento de maíz en ausencia de otras limitaciones es directamente proporcional a la radiación solar incidente. Por lo tanto, en condiciones de riego y en situaciones de mayor radiación (años “Niña”), la

fijación de biomasa es superior que en aquellos años en que la radiación incidente es menor (años “Niño”).

En 2009-10 no se encontraron diferencias en la deposición de MS entre el T1 y los Ts con deficiencias hídricas (T2, T3 y T4) en los muestreos realizados.

En cambio, en 2010-11 se detectaron diferencias estadísticas en la biomasa producida entre el T1 y el T2 en los muestreos 3 y 4 y las mismas fueron de 23 y 31% respectivamente, a favor del T1. Además, el T3 presentó una reducción de 20% de la biomasa en relación al T1 en el muestreo 4 aunque no se hallaron diferencias estadísticamente significativas.

El T4 fue el tratamiento en el que se generaron las mayores deficiencias hídricas y en el cual se hallaron las diferencias superiores en deposición de biomasa con el T1. Las mismas fueron detectadas en el muestreo 4 y alcanzaron a 42% a favor del T1.

El T5 mostró respuestas diferentes en los años estudiados, en concordancia con el distinto régimen de las precipitaciones. En 2009-10 no se detectaron diferencias en la biomasa entre el T5 y el T1. Por el contrario, en 2010-11 el T5 presentó una menor deposición de biomasa de 48% en relación al T1 (muestreo 4), obteniéndose diferencias significativas.

En 2010 las restricciones hídricas generadas en los T2, T3 y T4, impidieron capitalizar en producción de biomasa las condiciones de elevada radiación solar incidente. Esto es coincidente con lo mencionado por Hsiao y Bradford (1983) y Sinclair *et al.* (1984), en el sentido de que las deficiencias hídricas provocan una menor disponibilidad de agua para transpirar. Esto afecta el intercambio gaseoso a nivel estomático entre el cultivo y la atmósfera. Por tanto, existe una menor deposición de CO₂ a través del proceso de fotosíntesis y como consecuencia en los Ts con deficiencias hídricas ocurre una menor fijación de biomasa.

Asimismo, la tasa de crecimiento del cultivo se ve afectada negativamente ante las deficiencias hídricas con disminución en la eficiencia de intercepción de la radiación solar y de conversión de la misma en biomasa (Muchow, 1989).

Andrade *et al.* (1996) señalan que en situaciones de no deficiencia entre la emergencia y la floración del maíz se deposita el 40% de la MS total y desde esta etapa a madurez fisiológica el cultivo fija el 60% restante. La literatura es

coincidente en señalar que la repercusión en el rendimiento es menor cuando las deficiencias hídricas ocurren durante las etapas vegetativas en comparación a cuando suceden en las etapas reproductivas.

2.5.4. Rendimiento en grano y componentes

En la Figura 6, se muestran los rendimientos en grano logrados en los diferentes Ts en los dos años de estudio, los mismos indican que fueron significativamente ($P < 0,5$) afectados por las deficiencias hídricas.

Hall *et al.* (1982) destacan que las pérdidas en rendimiento de maíz por deficiencias hídricas dependen de la intensidad, de la duración y del momento del estrés.

Los rendimientos obtenidos en los T1, T2 y T3 en el año 2009-10 fueron inferiores a los logrados en 2010-11, en cambio el rendimiento en el T5 fue superior en 2009-10, indicando la importancia del aporte hídrico por parte de las PP durante esta temporada.

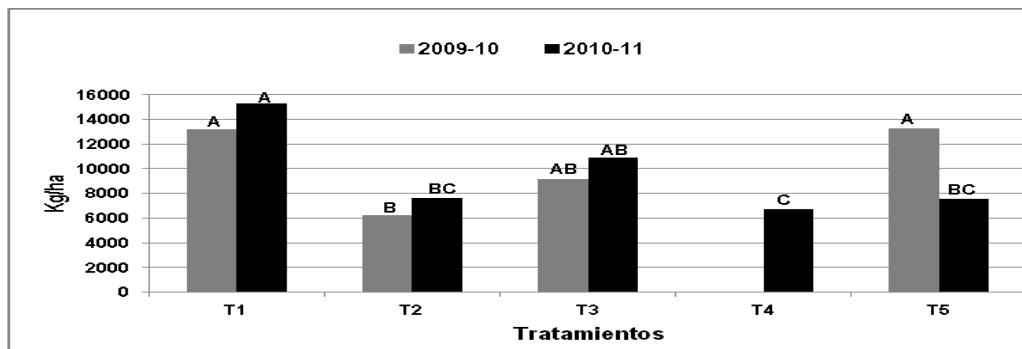


Figura 6. Rendimiento en grano por tratamiento. Temporadas 2009-10 y 2010-11

Se encontraron diferencias significativas en rendimiento entre el T1 y el T2 en ambos años. En el T2 se logró 47 y 50% del rendimiento obtenido en el T1 en 2009-10 y 2010-11, respectivamente. El entorno de la floración es la etapa más crítica para la determinación del rendimiento, en la misma se fija el número de granos por superficie, que es el componente que explica principalmente los cambios en el rendimiento. Es por ese motivo que el rendimiento se torna dependiente del estado fisiológico durante esta etapa y el mismo es altamente sensible a la disponibilidad

hídrica. Durante el PC la tasa de crecimiento es indicativa de la condición fisiológica del cultivo y por lo tanto de su capacidad para fijar granos (Andrade et al., 1999).

Çakir (2004) registró pérdidas en rendimiento de maíz de 40% por deficiencias de agua en el PC en relación al testigo sin deficiencias. Las deficiencias hídricas en esta etapa afectan la eficiencia de conversión de la radiación interceptada en biomasa, disminuyen la intercepción de la misma por acelerar la senescencia y reducen la partición de la materia seca a las espigas (Andrade et al., 1996).

Los rendimientos en el T3 fueron 69 y 71% de los obtenidos en el T1 en 2009-10 y 2010-11 respectivamente, sin registrarse diferencias significativas. Las deficiencias hídricas producidas en etapas posteriores a la floración presentan menores efectos sobre el rendimiento que en la etapa anterior (Ouattar *et al.*, 1987). Las deficiencias de agua en esta etapa reducen la tasa fotosintética y aceleran la senescencia foliar afectando fundamentalmente el peso del grano.

Cuando las deficiencias ocurren en las primeras etapas del llenado los efectos sobre el rendimiento son mayores que en las etapas posteriores, debido a que el embrión recién formado es susceptible de aborto en situaciones de estrés, afectando el número final de granos.

El T4 en 2010 mostró el 44% del rendimiento que el T1 encontrándose diferencias significativas ($P < 0,5$). Cuando el estrés hídrico se produce solo en las etapas vegetativas el efecto sobre los rendimientos es bajo, ya que no se afectan directamente los componentes del rendimiento (Çakir, 2004). En cambio, si las deficiencias hídricas además de ocurrir en las etapas vegetativas continúan durante el PC, como en el caso del T4, las disminuciones del rendimiento son mayores ya que se afecta el crecimiento vegetativo y el número de granos.

El T5 en el año 2009-10 presentó rendimientos similares al T1. En cambio, en 2010-11 mostró 49% del rendimiento del T1, detectándose diferencias significativas. El rendimiento de los Ts en secano es dependiente de las condiciones de precipitación y de radiación que ocurran principalmente durante el PC. En los años estudiados las condiciones climáticas fueron opuestas durante esta etapa, esto justifica los rendimientos diferentes logrados entre años en los T5.

En el Cuadro 4 se presentan los resultados obtenidos en los componentes del rendimiento: número de granos m^{-2} y peso de 1000 granos.

Cuadro 4. Componentes numéricos del rendimiento en grano

Año	Nº de granos m^{-2}		Peso de 1000 granos	
	2009	2010	2009	2010
Tratamiento				
T1	4477 A	5493 A	292 A	278 A
T2	2343 B	2644 B	286 A	284 A
T3	4321 A	4835 A	223 B	228 B
T4		2991 B		271 A
T5	4465 A	2949 B	278 A	255 AB

(*) Valores con letras iguales en el mismo año indican diferencias no significativas

En el año 2009-10 se detectaron diferencias ($P < 0,5$) en el número de granos m^{-2} entre el T1 y el T2. En el T2 se obtuvo el 52% de los granos logrados en el T1. En 2010-11 el comportamiento fue similar, en el T2 se logró el 48% de los granos obtenidos en el T1.

La incidencia de deficiencias hídricas en el PC provoca las mayores mermas en el número de granos. A su vez la disminución del rendimiento en este tratamiento fue de similar magnitud que la ocurrida en el número de granos.

En ambos años el número de granos obtenidos en el T3 no presentó diferencias con el T1. El comportamiento se justifica ya que las deficiencias durante la etapa de llenado de grano no afectan el principal componente del rendimiento.

En 2010 se detectaron diferencias ($P < 0,5$) entre el T4 con el T1 y entre el T4 con el T3. En el T4 con deficiencias en la etapa vegetativa y el PC, es lógico que el número de granos se vea afectado negativamente en comparación con los Ts sin deficiencias en el PC, según los argumentos explicitados anteriormente.

El T4 no presentó diferencias con el T2, pero sí una tendencia a producir un número de granos mayor. El comportamiento se puede explicar debido a que en el T2 al inicio del PC se presenta una mayor deposición de biomasa que en el T4, como consecuencia se provoca una mayor competencia por agua, luz y nutrientes en el T2, la que afectará negativamente la fijación de granos en este tratamiento. El T4 mostró

plantas con menor deposición de MS (Figura 4), por haber presentado deficiencias hídricas desde la etapa vegetativa.

En el T5 el número de granos mostró similar comportamiento que el rendimiento. En el año 2009-10 no hubo diferencias con el T1 y en 2010-11 se presentaron diferencias significativas entre ambos Ts. Las precipitaciones ocurridas en los años en los que se desarrolló el estudio afectaron el número de granos m^{-2} de los T5 debido a que las mismas determinaron condiciones diferentes para la fijación de granos.

En relación al peso promedio de granos, en el Cuadro 4 se muestra que el T3 fue el tratamiento que presentó menores pesos de grano. Se detectaron diferencias significativas con T1 y T2 en los dos años de estudio y con el T4 en 2010-11.

Las diferencias en el peso promedio de grano entre el T3 y los restantes Ts evaluados se explican principalmente por las modificaciones en la tasa de crecimiento del grano en la etapa de llenado provocadas por las deficiencias hídricas generadas en el T3.

2.6. CONCLUSIONES

El rendimiento potencial de maíz sin estrés hídrico fue de 13.200 y 15.300 $kg\ ha^{-1}$ para los dos años estudiados, los que presentaron características climáticas contrastantes.

Las pérdidas de rendimiento en grano por estrés hídrico durante el PC fueron de 47 y 50 % del rendimiento potencial. En el caso de la ocurrencia de deficiencias hídricas durante la etapa de llenado de grano la disminución del rendimiento varió entre 29 y 31 %.

Cuando las deficiencias se generaron durante la etapa vegetativa y continuaron durante el PC, los rendimientos de maíz disminuyeron 56 %.

2.7. BIBLIOGRAFÍA

Allen RG, Pereira LS, 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 FH, Aguirrezábal LAN, Rizzalli RH.** 2000. Crecimiento y rendimiento comparados. En: Andrade FH, Sadras VO. [Eds.]. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires. Editorial Médica Panamericana. pp. 61 - 96.
- Andrade FH, Vega C, Uhart S, Cirilo A, Cantarero M, Valentinuz O.** 1999. Kernel number determination in maize. *Crops Sciences*, 39: 453 - 459.
- Andrade FH, Cirilo A, Uhart S, Otegui ME. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. Balcarce. Editorial La Barrosa, INTA Balcarce, FCA UNMP, Dekalbpress. 292p.
- Baethgen WE, Terra R.** 2010. El riego en un clima cambiante. En: 1er Seminario Internacional Potencial del Riego Extensivo en cultivos y pasturas. Grupo de Desarrollo del Riego, Paysandú, Uruguay. Montevideo. Imprenta Boscana. pp. 7-18.
- Çakir, R.** 2004. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*, 89: 1-16.
- Cardellino G, Baethgen WE.** 2000. Análisis de viabilidad de sistemas de riego para maíz: Estudio de casos y evaluación de estrategias. En: Tecnología de producción de cultivos y pasturas. Montevideo: INIA. (Actividades de Difusión; 227). pp. 47 - 55.
- Claassen MM, Shaw RH.** 1970. Water deficit effects on grain: II Grain components. *Agronomy Journal*, 62: 652 - 655.
- English MJ, Musick JT, Murty VVN.** 1990. Deficit irrigation. En: Management of farm irrigation systems. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers. pp. 631 - 663.
- Fereres E, Soriano MA.** 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2): 147 - 159.
- Hall AJ, Vilella F, Trapani N, Chimenti CA.** 1982. The effects of water stress and genotype on the dynamics of pollen-shedding and silking in maize. *Field Crops Research*, 5: 349 - 363.
- Hsiao TC, Bradford KJ.** 1983. Physiological consequences of cellular water deficits. En: Taylor HM, Jordan WR, Sinclair TR. [Eds.]. Limitations to efficient water use in crops production. Madison: ACA, CSSA, SSSA. pp. 227 - 265.

Molfino J, Califra A. 2001. Agua disponible en las tierras del Uruguay: Segunda aproximación. MGAP. Montevideo: MGAP. 12p.

Muchow RC. 1989. Comparative productivity of maize, sorghum and pearl millet in a semi-arid tropical environment: II. Effect of water deficits. *Field Crops Research*, 20: 207 - 219.

NeSmith DS, Richie JT. 1992. Maize (*Zea mays* L.) response to a severe soil water-deficit during grain-filling. *Field Crops Research*, 29: 23-35.

Otegui ME, Andrade FH, Suero EE. 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Research*, 40: 87 - 94.

Ouattar S, Jones RJ, Crookston RK. 1987. Effect of water deficit during grain filling on the pattern of maize kernel growth and development. *Crop Science*, 27: 726 - 730.

Sawchik J, 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. Montevideo: INIA. (Actividades de Difusión; 417). pp. 41 - 45.

Sawchik J, Formoso F. 2000. Inserción del riego en rotaciones de cultivos y pasturas. En: Tecnología de producción de cultivos y pasturas. Montevideo: INIA. (Actividades de Difusión; 227). pp.13 - 25.

Schussler JR, Westgate ME. 1995. Assimilate flux set at low water potential in maize. *Crops Science*, 35: 1075 - 1080.

Sinclair TR, Tanner CB, Bennett JM. 1984. Water-use efficiency in crop production. *BioScience*, 34(1): 36 - 40.

3. EFECTO DE LAS DEFICIENCIAS HÍDRICAS EN DIFERENTES ETAPAS DE DESARROLLO SOBRE EL RENDIMIENTO DE SOJA²

Giménez L.*

*Departamento de Producción Vegetal. Estación Experimental Mario A. Cassinoni. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Ruta 3, km 363, 60000 Paysandú, Uruguay. Correo electrónico: kapoexe@fagro.edu.uy

3.1. RESUMEN

La soja [*Glycine max* (L.) Merrill.] es el principal cultivo del país, se realiza en secano y los rendimientos obtenidos son inferiores a los de la región. Las deficiencias hídricas son la principal limitante de los ambientes de producción, las mismas afectan el rendimiento por la disminución en la acumulación de materia seca y por los efectos negativos en la fijación biológica de N₂. Se desarrollaron dos ensayos en años consecutivos con características climáticas contrastantes. El objetivo fue cuantificar las pérdidas de rendimiento provocadas por deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo. Se evaluaron cuatro tratamientos: sin deficiencias hídricas (T1), deficiencias durante el periodo crítico (PC, T2), deficiencias en las etapas no críticas previas al PC (T3) y secano (T4). Las deficiencias se generaron por intercepción de las precipitaciones (PP) a través de la utilización de simuladores de sequía y el bienestar hídrico se logró con riego suplementario. Las deficiencias hídricas durante el PC provocaron diferencias significativas y disminuciones del rendimiento de 44 a 50 %, el estrés hídrico en las etapas previas al PC no generó diferencias estadísticas y provocó pérdidas de 23%. Los rendimientos sin deficiencias hídricas en el primer y segundo año duplicaron y triplicaron a los promedios del país. Las pérdidas de rendimiento por deficiencias hídricas y los rendimientos sin deficiencias justifican evaluar diferentes estrategias de manejo del agua de riego.

² Publicado: Agrocencia (Uruguay). 2014. 18 (1): 53-64.

3.2. SUMMARY

Rainfed soybean [*Glycine max* (L.) Merrill.] is the main crop in Uruguay and yields are lower than those obtained in the region. Water deficiency is the major limiting factor in the production environments, as it negatively affects yield due to the decrease in both dry matter accumulation and biological N₂ fixation. Two studies have been carried out during two consecutive years with contrasting climatic characteristics. The aim was to quantify yield losses due to water deficiency at different stages of crop development. Four treatments were defined; without any water deficiency (T1), with water deficiency during the critical period (CP, T2), with water deficiencies during non-critical periods previous to CP (T3) and rainfed (T4). To obtain water deficiencies rainfall was intercepted (PP) by using rain shelters while water availability was achieved by supplementary irrigation. Water deficiencies during CP caused significant differences and lowered the yield from 44 to 50%. Water stress previous to CV did not produce significant differences and the loss was of 23%. Without water stress, both during the first and the second year, the yields doubled and tripled the country averages. Yield losses due to water deficiency and yields under no water stress show the need to evaluate different management strategies for irrigation.

3.3. INTRODUCCIÓN

La soja es el principal cultivo agrícola del país se realiza mayoritariamente en condiciones de secano y los rendimientos logrados son inferiores a los obtenidos en la región.

El estrés hídrico es considerado a nivel mundial como el factor más importante en limitar el crecimiento y el rendimiento de las plantas (Boyer, 1982). Las deficiencias hídricas son una de las principales limitantes ambientales que presenta la soja en el país (Sawchik y Ceretta, 2005; Giménez y García Petillo, 2011). Las mismas afectan el rendimiento, a través de la disminución en la acumulación de materia seca y por los efectos negativos sobre el crecimiento celular, la expansión foliar y la fijación biológica de N₂ que es especialmente vulnerable a las deficiencias de agua (Sinclair y Serraj, 1995; Serraj et al., 1999).

Las características morfológicas y fisiológicas de la soja le otorgan capacidad para compensar daños causados por estrés hídrico, la posibilidad de ramificar, la extensa etapa de floración y la producción de un número de estructuras reproductivas superior a las que realmente concreta son mecanismos que permiten compensar deficiencias hídricas (Andrade et al., 2000).

La etapa de desarrollo en la que ocurren las deficiencias es determinante del rendimiento, porque a una misma intensidad y duración de la deficiencia, el efecto será diferente (García y Ferrarotto, 2009). Las etapas del ciclo de mayor sensibilidad a la ocurrencia de deficiencias hídricas son las comprendidas entre la fructificación avanzada y el llenado de granos, etapas entre R4 y R6 (Fehr y Caviness, 1977), es decir el periodo más crítico de determinación del rendimiento. Esto se debe, a que durante estas etapas la capacidad de compensación del cultivo se ve reducida, debido a que, al aborto floral por deficiencias hídricas, se le agrega el de las vainas de menor tamaño, que son las estructuras reproductivas que presentan mayor susceptibilidad de abscisión. Las pérdidas de rendimiento en el periodo crítico (PC) resultan de reducciones en el número de vainas por planta (Momen et al., 1979; Korte et al., 1983; Pandey et al., 1984) y disminuciones en los granos por vaina y peso de granos (Baigorri y Croatto, 2000), afectándose de esa manera el principal componente del rendimiento que es el número de granos por superficie.

La literatura es abundante en determinar los efectos de las deficiencias hídricas en el rendimiento en grano de soja, sin embargo, no está claro cuánto se pierde en las diferentes etapas fenológicas. Este aspecto resulta de interés para definir estrategias de riego suplementario. El objetivo principal del trabajo fue cuantificar las pérdidas de rendimiento en grano provocadas por deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo.

3.4. 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 los años agrícolas 2009-10 y 2010-11.

El suelo del campo experimental se caracterizó como un Brunosol sub-éutrico típico (Fine, thermic, superactive, mixed, Pachic Argiudoll), perteneciente a la formación Fray Bentos y a la unidad San Manuel en la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (escala 1:1000.000), Altamirano et al. (1976).

El análisis químico realizado en octubre de 2009 indicó que el suelo presentaba 3,3 % de M.O., 10 ppm de N-NO₃ y 10 ppm de P, en noviembre de 2010 el análisis de P en suelo indicó 20 ppm.

El suelo fue fertilizado en 2009 con 120 kg ha⁻¹ de P-PO₄ la fuente fue súper fosfato triple de calcio (0-46-46-0) aplicado previo al laboreo e incorporado con el mismo, en 2010, no fue necesario fertilizar con P.

El laboreo realizado en ambos experimentos fue de tipo convencional y se realizó con rastra de discos excéntrica y rastra de dientes.

Las características hidrológicas principales del suelo se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Parámetros hídricos y físicos del suelo

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

En las Figuras 1 y 2 se muestran las precipitaciones (PP) y la radiación solar mensual durante la estación de crecimiento en los años 2009-10 y 2010-11.

Las siembras fueron realizadas con una sembradora experimental, el 07 de diciembre y el 29 de noviembre de 2009 y 2010, respectivamente.

El material genético utilizado de soja fue la variedad DM 5.1 i.

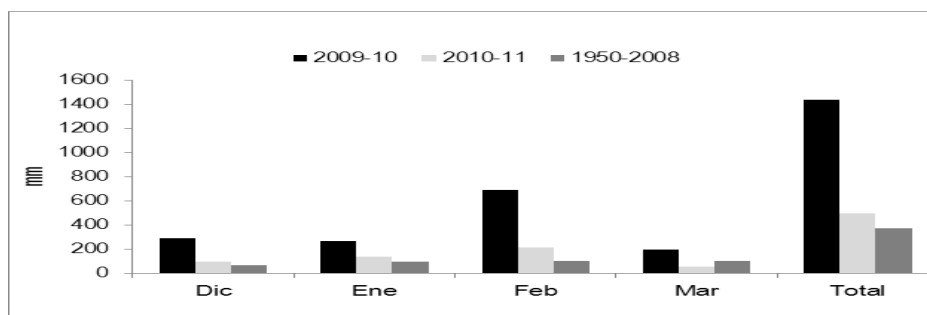


Figura 1. Precipitaciones mensuales en mm. Temporadas 2009-10, 2010-11 y promedio de serie 1950-2008

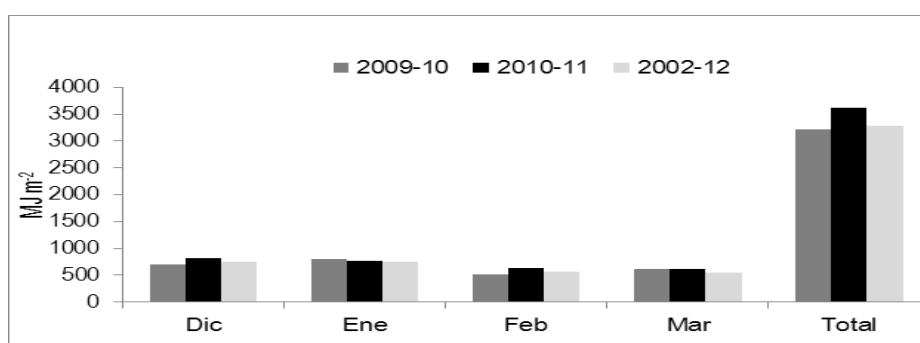


Figura 2. Radiación solar incidente acumulada mensual y en ciclo total (MJ m^{-2}) Temporadas 2009-10, 2010-11 y promedio serie 2002-12

Cada parcela presentó una dimensión de 5 m de longitud por 2 m de ancho, y las mismas estuvieron compuestas por 5 surcos de cultivo y una distancia entre hileras de 0,4 m. La población lograda fue de 347000 plantas ha^{-1} .

El control de malezas se realizó con el herbicida Glifosato en dosis de 2 l ha^{-1} de producto comercial, se realizaron tres aplicaciones post emergencia en cada año, de acuerdo a la evolución del enmalezamiento.

Los tratamientos (T) evaluados en los ensayos realizados fueron:

T1= Sin deficiencias hídricas

T2= Deficiencias hídricas en el PC de determinación del rendimiento, definido entre las etapas R4 y R6 (Fehr y Caviness, 1977). En 2009-10 el PC se ubicó temporalmente entre el 13/02 y 15/03 y en 2010-11 entre el 03/02 y 02/03.

T3= Deficiencias hídricas en las etapas no críticas (ENC) previas al PC las que abarcaron las etapas vegetativas y desde R1 a R3. En 2010-11 la ubicación temporal de estas etapas fue entre 07/12 y 02/02.

T4= Secano

En el primer año de estudio el T3 fue considerado como tratamiento perdido debido a que las características climáticas del año impidieron interceptar las PP en las ENC.

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

El riego se realizó a través de un sistema de goteo, con cintas con goteros cada 0,2 m y con un caudal/gotero de 1,49 l h⁻¹. El riego se aplicó de acuerdo a la variación del porcentaje de agua disponible (AD), la cual fue estimada 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: $\Delta S = PP + R - ET_c$, siendo: ΔS = variación de AD (mm), R= riego (mm) y ET_c = evapotranspiración de cultivo (mm), calculada como $ET_c = ETo \times K_c$, siendo ETo 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 K_c propuestos por FAO (Allen et al., 1998). Los parámetros climáticos para estimar la ETo fueron medidos a través de una estación meteorológica automática Vantage Pro 2TM, modelo 6510 (Davis Instruments, Hayward, CA), ubicada aproximadamente a 2000 m del sitio experimental. Se determinó el inicio del riego durante 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 40% en ENC y hasta 60% AD en el PC.

Los simuladores de sequía fueron contruidos en hierro con cubiertas de lona impermeable, las dimensiones de los mismos fueron de 2 m de ancho, 5 m de longitud y 1,5 m de altura máxima. Las estructuras de hierro fueron diseñadas con 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 del mismo, intentando no modificar sustancialmente las

condiciones de radiación solar y temperatura. Las parcelas estuvieron limitadas externamente por una ronda de 20 cm 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 el Cuadro 2 se muestran las PP totales ocurridas durante los ciclos, el volumen de agua de riego y el número de eventos y el volumen de PP interceptado por los simuladores, para cada tratamiento y cada año.

Cuadro 2. Número de riegos, riego (mm), precipitaciones (mm), número de eventos interceptados y precipitaciones interceptadas (mm).

Año	Nº de riegos		Riego (mm)		Prec. (mm)		Nº de eventos interc.		Prec. interc. (mm)	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Tratamiento										
T1	5	11	180	414	1315	456	0	0	0	0
T2	2	7	72	236	1090	379	3	1	225	77
T3	-	5	-	198	-	447	-	1	-	9
T4	0	0	0	0	1315	456	0	0	0	0

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. Previamente a la utilización del equipo se construyó una curva de calibración para el suelo del campo experimental. Para ello se midió el contenido de humedad del suelo a través del método gravimétrico y se realizaron las lecturas a las mismas profundidades con la sonda de neutrones, obteniendo una curva de calibración del equipo ajustada con $r^2 = 0,95$. Las mediciones de agua se realizaron cada 0,1 m, en tubos de acceso de aluminio de 1 m de longitud y 2 pulgadas de diámetro. En el año 2009-10 las mediciones de agua se realizaron en las siguientes fechas: 08/01, 20/01, 26/01, 30/01, 08/02, 17/02, 22/02, 27/02, 06/03 y 11/03. En 2010-11 fueron realizadas el 23/12, 29/12, 10/01, 21/01, 28/01, 10/02, 21/02, 02/03 y 14/03.

Se efectuaron tres muestreos de biomasa de la parte aérea coincidiendo aproximadamente con los estadios de inicio de PC 27/01/10 y 02/02/11 (muestreo 1),

final del PC 24/02/10 y 10/03/11 (muestreo 2) y maduración 10/03/10 y 30/03/11 (muestreo 3). En cada muestreo se cortó 1 m lineal de plantas a 3 cm del suelo por tratamiento, los muestreos 1 y 2 se realizaron en el cuarto surco a 0,3 m de cada borde, el muestreo 3 se realizó en el área de cosecha. Las muestras fueron pesadas frescas en laboratorio y una sub-muestra proveniente de cada parcela se secó en estufa a temperatura de 60 °C hasta obtener peso constante, de esa manera se calculó el porcentaje de materia seca (MS) de cada muestra.

El rendimiento en grano fue estimado a partir de 4 m lineales de plantas, se cosecharon 3 m del segundo surco y 1 m del tercero en el centro de cada hilera. En la superficie de cosecha de cada parcela se determinó el número de granos m⁻² y se midió el peso promedio de grano.

El diseño experimental fue de bloques completamente aleatorizados, ajustándose el modelo

$Y_{ij} = \mu + t_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$ donde: μ es la media general, t es el efecto de los tratamientos, β es el efecto de los bloques, ε es el error experimental, siendo i : tratamientos 1, 2, 3 y 4, j = bloques 1, 2 y 3. Se realizaron contrastes ortogonales para comparar los tratamientos evaluados, se utilizó el test de Tuckey en todos los casos con un nivel de significación del 5 %. Los análisis fueron realizados mediante el paquete estadístico SAS v.9.2 (SAS, Institute Inc., 2008).

3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.5.1. Evolución del agua disponible en el suelo

En el año 2009-10 el T1 presentó un porcentaje elevado de AD durante las diferentes etapas del ciclo de acuerdo a la planificación realizada. El T2 mantuvo deficiencias durante el PC, no obstante, se detectó un ascenso del AD al inicio de dicho periodo debido al ingreso de agua de PP que no fue posible interceptar a través de la metodología experimental. El T4 mostró un elevado y variable contenido de AD en la mayor parte del ciclo por causa de las PP abundantes ocurridas en este año (Figura 3).

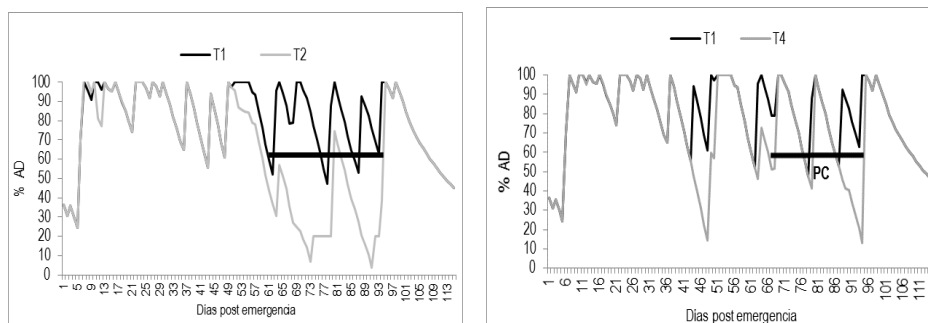


Figura 3. Evolución del porcentaje de agua disponible (% AD) en tratamientos 2 y 4 en relación al 1. Temporada 2009-10

En el año agrícola 2010-11 el T1 presentó un contenido alto de AD durante la mayor parte del ciclo. El T2 mostró bajos porcentajes de AD en parte del PC, no obstante, hubo dos ingresos de PP no interceptados, por lo que no se cumplió totalmente la planificación. El T3 presentó un bajo contenido de AD durante las ENC previas al PC. El T4 presentó diferencias notorias con lo ocurrido el año anterior, se detectaron deficiencias hídricas en las primeras etapas de desarrollo las que continuaron en el PC, no obstante, hubo un aporte de agua de PP al inicio de dicha etapa (Figura 4).

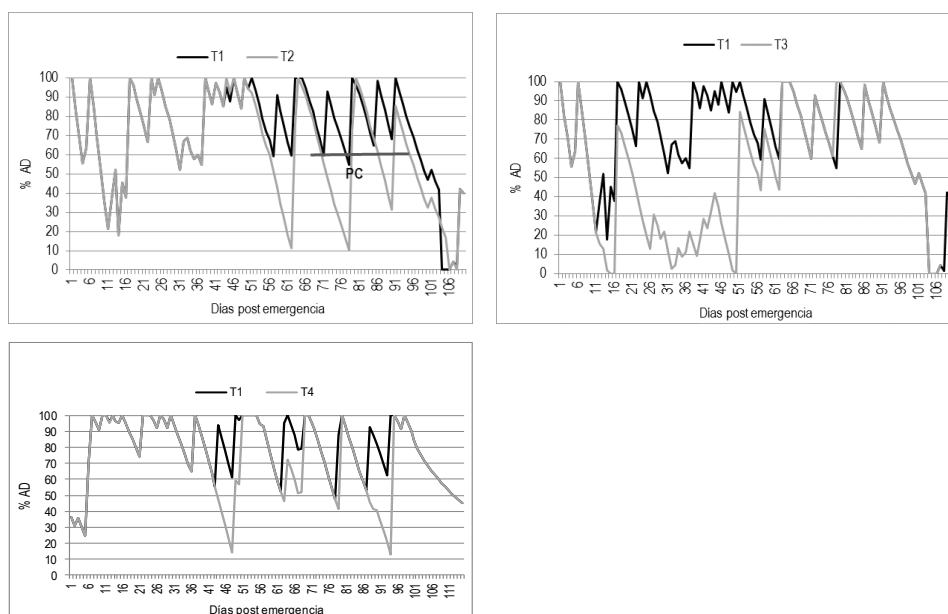


Figura 4. Evolución del porcentaje de agua disponible (% AD) en los tratamientos 2, 3 y 4 en relación al 1. Temporada 2010-11

3.5.2. Consumo estimado de agua

En el Cuadro 3 se muestra la estimación del consumo de agua por etapas de desarrollo y durante el ciclo total del cultivo.

Cuadro 3. Estimación del consumo de agua (mm) en las etapas de desarrollo y en el ciclo total por tratamiento.

El T1 presentó diferencias en el consumo de agua entre años, en 2009-10

Año	VE - R1		R1 - R3		R4 - R6		R7 - R8		VE - R8	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
T1	68	71	148	189	149	150	64	94	429	504
T2	68	71	148	189	96	109	52	72	364	441
T3	-	67	-	128	-	150	-	94	-	439
T4	68	67	137	115	134	109	59	67	398	354

fueron notoriamente menor. Esto se justificó por la ocurrencia de un número elevado de días con PP que provocaron una baja radiación solar incidente y consecuentemente menor consumo de agua.

El consumo de agua del T1 en 2010-11 fue similar al estimado por Giménez y García Petillo (2011) para soja de ciclo corto con riego.

En el T2 en los dos años de estudio hubo ingresos de PP a las parcelas durante el PC, no planeados, esto permitió un mayor consumo de agua que el planificado para este tratamiento.

Las diferencias de consumo de agua entre T1 y T2 fueron de 65 y 63 mm para el primer y segundo año de estudio. Entre el T3 y el T1 en 2010-11 hubo una diferencia de consumo de 61 mm en las ENC. El T4 fue el tratamiento que presentó las menores diferencias en consumo de agua entre años (44 mm) no obstante a ser realizado en secano. En 2009-10 este tratamiento fue el que presentó las menores diferencias con el T1 (31 mm) y en 2010-11 las mayores (150 mm), esto se explicó por las distintas disponibilidades hídricas que tuvo el tratamiento en secano en los dos años de evaluación (Cuadro 3).

El consumo de agua del T4 en 2010-11 fue similar al estimado por Giménez y García Petillo (2011) para soja en secano.

3.5.3. **Producción de biomasa**

En la Figura 5 se muestra la evolución de la acumulación de MS en los tres muestreos realizados para los diferentes tratamientos evaluados en los años 2009-10 y 2010-11.

Las características climáticas del año agrícola 2009-10, provocaron que el T1 presentara limitaciones para expresar el potencial de producción de MS, esto se debió a la reducida radiación solar incidente a causa de los excesos de PP logrando acumular un máximo de 8347 kg ha⁻¹ al estadio R6. En cambio, en 2010-11, las condiciones climáticas preponderantes con menores PP y alta radiación solar incidente, provocaron que el T1 presentara una acumulación de MS de 16168 kg ha⁻¹ a R6, aproximadamente el doble que el año anterior.

Los valores obtenidos en producción de MS en 2010-11 fueron superiores a los que registraron Andrade y Sadras (2000), en experimentos con riego realizados en la región, con registros de 12000 kg ha⁻¹ de MS. Sin embargo, Açıkgöz et al. (2013), en evaluaciones de diferentes cultivares y distancias entre hileras obtuvieron acumulaciones de MS a R5 de 18252 kg ha⁻¹. No obstante dada la importancia que tienen en la producción de MS de soja las características genéticas (GM) y climáticas (PP, radiación solar, fotoperiodo y temperaturas), las comparaciones con situaciones productivas diferentes, en estos aspectos, no permite extraer conclusiones sólidas.

La acumulación de MS del T1 en 2010-11 fue elevada, sin embargo, sensiblemente inferior a las logradas en ambientes similares en especies C4. En estudios equivalentes en maíz, en los tratamientos sin deficiencias hídricas, se logró acumular 25200 kg ha⁻¹ de MS (Giménez, 2012), las diferencias se justifican debido a que el

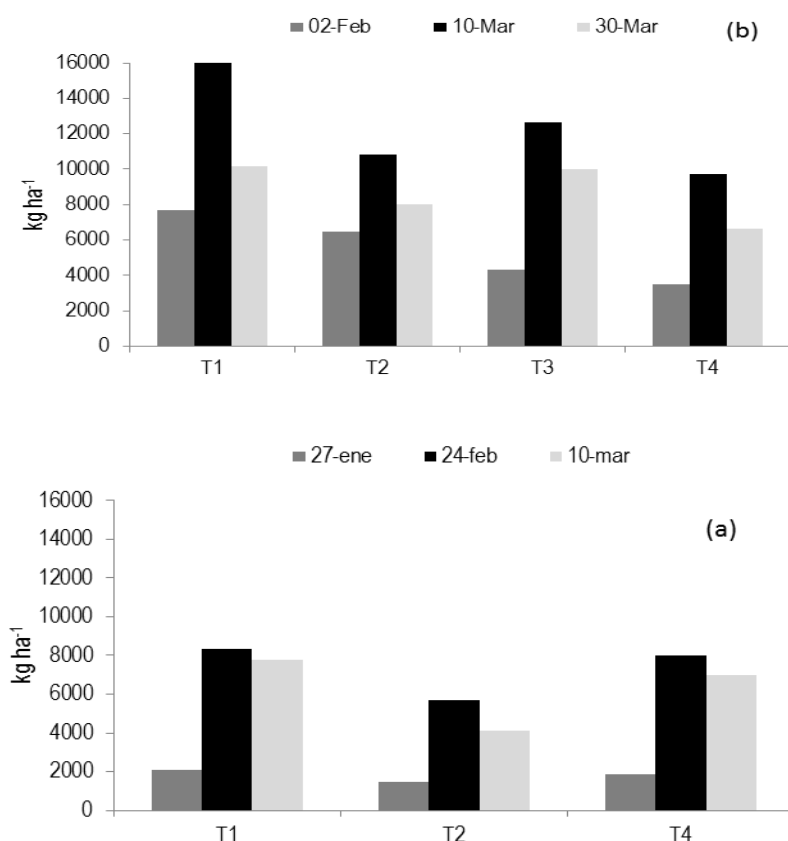


Figura 5. Evolución de la materia seca (MS, kg ha^{-1}) en los tratamientos evaluados. Temporadas 2009-10 (a) y 2010-11 (b)

maíz es una especie C4 con proceso fotosintético más eficiente que el de soja. En cambio, en 2009-10 el T2 fue el tratamiento con menor producción de MS entre los evaluados, en el muestreo 2 hubo una diferencia de la MS de 32 % en relación a la producida en el T1, debido a las deficiencias hídricas provocadas durante el PC.

En 2010-11, se detectó una disminución en la producción de MS del T2 de 19 % en relación al T1. La menor disminución de MS del T2 referida al T1, en relación a la obtenida en 2009-10, se debió a PP no interceptadas en el T2, las que provocaron que las deficiencias hídricas en el PC fueran menores a las planificadas. El T3 mostró una reducción de la MS acumulada de 21 % en comparación con el T1, indicando una baja significación de las deficiencias hídricas durante las ENC en la acumulación de MS.

En 2009-10 no se encontraron diferencias en la acumulación de MS entre el T1 y el T4, dadas las características climáticas ya mencionadas que impidieron al T1 expresar el potencial de producción de MS del cultivo. En 2010-11 el T4 presentó una disminución en la acumulación de MS en relación al T1 de 37 % en el muestreo 2, se constató una respuesta diferente al año anterior, en concordancia con el comportamiento diferencial de las PP entre años

En 2010-11 las deficiencias hídricas provocadas en los T2 y T3 y las ocurridas en el T4 por las escasas PP, impidieron capitalizar en producción de MS las condiciones de elevada radiación solar incidente. En el T1 se expresó adecuadamente el potencial de producción de MS que presenta la soja en los ambientes de producción del país en condiciones de alta luminosidad y elevada disponibilidad hídrica.

3.5.4. **Rendimiento en grano**

En la Figura 6 se muestran los rendimientos obtenidos en los tratamientos evaluados en los dos años de estudio, los mismos presentaron diferencias significativas ($P < 0,05$).

Los rendimientos logrados en el T1 en 2009-10 y 2010-11 fueron 195 y 291 g m⁻¹ lineal y extrapolados se obtuvieron 4885 y 7275 kg ha⁻¹, respectivamente. Cabe destacar que los mismos fueron elevados en relación a los rendimientos promedio del país, principalmente los logrados en el segundo año del estudio. La literatura registra un amplio rango de rendimientos máximos de soja a nivel mundial que oscila entre 4500 y 8600 kg ha⁻¹ aproximadamente (Flannery, 1983; Cooper, 2003; Lawn et al., 1984; Setiyono et al., 2007).

La evaluación nacional de cultivares realizada en secano, en los materiales evaluados entre 2009 y 2011 registró rendimientos máximos que variaron entre 4789 y 5825 kg ha⁻¹ (INASE e INIA, 2013). Las variaciones en los rendimientos máximos de soja son consecuencia de la diferente disponibilidad de radiación, agua y nutrientes y la disponibilidad hídrica es el factor más limitante, por lo que el manejo del agua es el aspecto principal sobre el cual trabajar para disminuir las brechas en producción de soja (Salvagiotti, 2009).

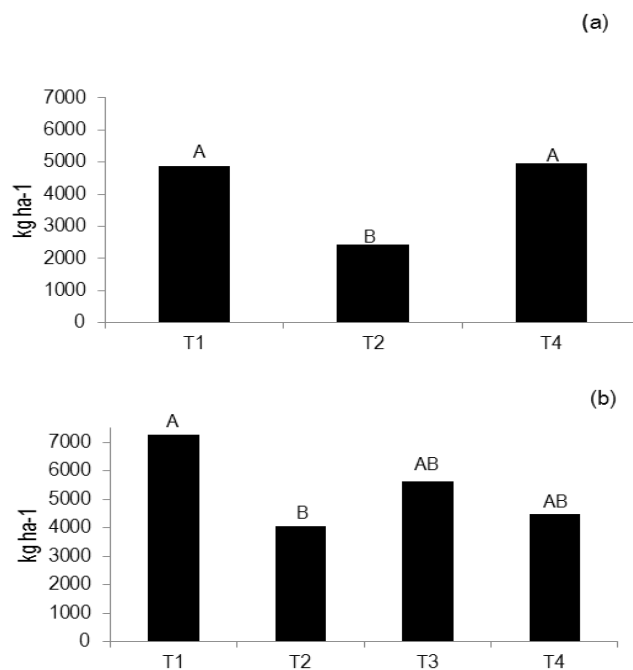


Figura 6. Rendimiento en grano (kg ha⁻¹) en los tratamientos evaluados. Temporadas 2009-10 (a) y 2010-11 (b)

Los rendimientos del T1 comparados con los obtenidos en los T2, T3 y T4 permiten constatar la importancia de las deficiencias hídricas en el rendimiento de soja.

En los dos años, se encontraron diferencias significativas entre el T1 y el T2, en el T2 se logró entre el 50 y 44 % del rendimiento obtenido en el T1 en 2009-10 y 2010-11, respectivamente. En acuerdo con estos resultados, Andriani (2000) señala que un estrés en llenado de grano (R5 - R6), produce la reducción simultánea del número de vainas, del número de granos por vaina y del peso de los granos y que las deficiencias hídricas severas durante esta etapa provocaron pérdidas de rendimiento mayores a 40%.

Las disminuciones porcentuales en el rendimiento de soja detectadas a causa de deficiencias hídricas durante el PC fueron similares a las cuantificadas recientemente en maíz (Giménez, 2012), no obstante, la conocida y elevada sensibilidad a la falta de agua que el maíz presenta durante el PC (Andrade y Sadras, 2000; Andrade et al., 1996; Cárcova et al., 2003; Hall et al., 1981). En el PC de soja se produce una alta competencia por fotoasimilados en la planta, la tasa de crecimiento del cultivo durante esta etapa es determinante del número de vainas y de granos que sobreviven

y ésta es la principal variable de ajuste del número definitivo de granos por superficie (Kantolic y Slafer, 2003).

Los rendimientos logrados en el T3 presentaron una disminución del 23% en relación a los obtenidos en el T1 en el año 2010-11, sin registrarse diferencias significativas. Egli et al., (1983), generaron estrés hídrico en soja entre la siembra y R5 y no detectando diferencias en rendimiento con el testigo sin deficiencias. Andriani (2000), determinó disminuciones del rendimiento por deficiencias hídricas en las etapas vegetativas del 10%. En este estudio el T3 comprendió las etapas vegetativas previas a la floración y la floración. La floración en soja es una etapa de menor importancia relativa sobre el rendimiento que el llenado de grano (Andriani et al., 1991) y de inferior significación en la determinación del rendimiento que en otras especies (Andrade, 1995). Esto se debe a que es una etapa de desarrollo extensa, de más de 20 días de duración, asimismo la especie produce un número de flores superior al que concreta, esto permite que exista cierta compensación ante situaciones de estrés generadas en la etapa. En ese sentido, Andrade y Sadras (2000) destacan la alta estabilidad del rendimiento de soja en respuesta al estrés entre las etapas R1 y R3.

Los T4 presentaron rendimientos similares en los dos años estudiados, sin embargo, las condiciones climáticas fueron muy diferentes. Esto se explicó porque en ambos años las PP durante el mes de febrero fueron elevadas y a su vez en ese mes se ubicó mayoritariamente el PC. En 2009-10 no se detectaron diferencias entre el T1 y el T4 debido a los excesos de PP y a la baja radiación solar incidente ya comentadas, que provocaron elevados rendimientos en el T4 y disminuciones del potencial en el T1. En cambio, en 2010-11 los rendimientos del T4 se ubicaron 38% por debajo del obtenido en el T1, detectándose diferencias significativas ($P < 0,05$). En este año, la falta de disponibilidad hídrica en el tratamiento de secano en las diferentes etapas de desarrollo impidió lograr rendimientos más elevados que permitían las condiciones de radiación solar y que si fueron concretados en el T1 con una adecuada disponibilidad de agua suministrada a través del riego.

3.5.5. Número de granos por superficie

En las Figura 7 se muestran los resultados obtenidos en el número de granos por superficie, en los tratamientos evaluados para los dos años de estudio.

En el año 2009-10, se detectaron diferencias significativas ($P<0,05$) entre tratamientos, se destacó el bajo número de granos, incluso en el T1, no logrando este tratamiento superar los 2500 granos m^{-2} , el T2 presentó el 50% de los granos fijados en el T1. La baja radiación solar causada por el exceso de PP impidió lograr tasas de crecimiento altas durante el PC afectando en forma negativa el número de granos. En el T2 además de las restricciones en la radiación, se sumaron las deficiencias hídricas, las cuales afectaron aún más la intercepción de la radiación solar incidente y en consecuencia las tasas de crecimiento del cultivo y los granos fijados. El número de granos final determinado durante las etapas R3 – R6 es función de la tasa de crecimiento del cultivo durante esta etapa (Andrade y Ferreiro, 1996).

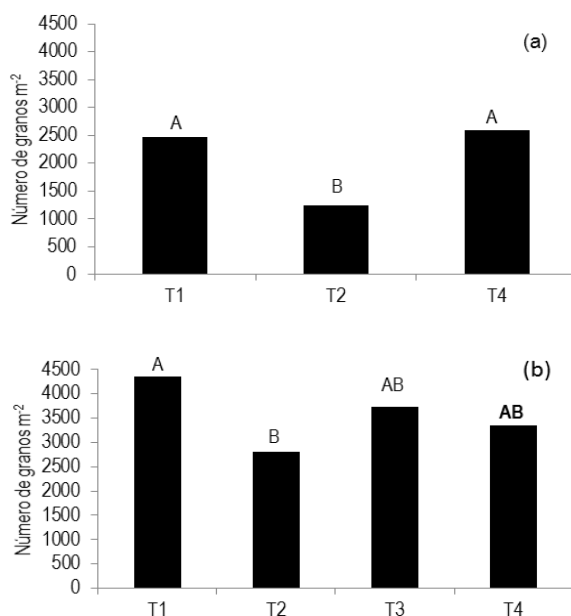


Figura 7. Número de granos por m^{-2} en los tratamientos evaluados. Temporadas 2009-10 (a) y 2010-11 (b)

En 2010-11, no se detectaron diferencias entre T1 y T2, no obstante, se observó una clara tendencia en el T1 a presentar un mayor número de granos por superficie. En

este tratamiento se obtuvieron 4362 granos m^{-2} , este elevado número de granos se debió a las condiciones de radiación solar ya analizadas, las que permitieron una elevada acumulación de MS y la fijación de un alto número de granos por unidad de superficie. El T2 mostró el 64% de los granos fijados en el T1, como ya se indicó las deficiencias hídricas producidas en el PC afectaron negativamente la acumulación de MS y con ello la fijación de granos.

En el T3 en 2010-11, no se detectaron diferencias significativas con el T1 y la disminución en el número de granos fue sólo de 15%. Las deficiencias hídricas en las etapas anteriores al PC provocan disminuciones menores en el número de vainas y en el número de granos por vaina, en la medida que se restablezca la disponibilidad hídrica a partir de R4 se produce una compensación en el rendimiento por una mayor producción de flores y vainas durante las etapas R4 –R6 (Andriani et al., 1991)

En 2009-10, el T4 no presentó diferencias significativas con el T1 en el número de granos fijados. En 2010-11, el T4 mostró una disminución del 33% en el número de granos m^{-2} en relación al T1, encontrándose diferencias significativas. Las diferentes condiciones de PP y radiación solar provocaron que el T4 presentara una acumulación de MS y tasas de crecimiento de cultivos diferentes en los años estudiados. En el primer año, el T4 mostró similares tasas de crecimiento y acumulación de MS que el T1, esto justificó la obtención de un número de granos similar. En el segundo año, hubo una disminución notoria en la tasa de crecimiento del T4 en la PC generada por deficiencias hídricas ocurridas en esta etapa las que afectaron en forma negativa la fijación de granos.

Peso promedio de granos

En la Figura 8 se muestra el peso promedio de granos obtenido en los tratamientos evaluados, en ambos años.

En 2009-10, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos y el peso promedio de grano fue elevado. Como se mostró en el apartado anterior, el número de granos por superficie fijado en el primer año de estudio fue bajo en los diferentes tratamientos, debido a las condiciones de radiación solar escasa principalmente durante el PC. Estas condiciones permitieron que el bajo número de granos fijado dispusiera de carbohidratos suficientes para obtener un alto peso

promedio de grano, en los tres tratamientos. Kantolic et al. (2003), afirman que cuando ocurren variaciones en la fotosíntesis en el PC y el número de granos es reducido, durante el posterior crecimiento de los granos puede aumentar la disponibilidad de asimilados por unidad de grano y consecuentemente aumentar su ritmo de crecimiento y su peso final.

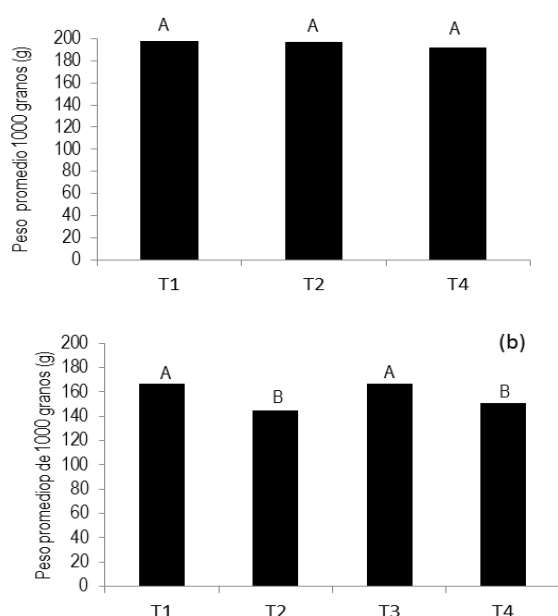


Figura 8. Peso de 1000 granos (g) en los tratamientos evaluados. Temporadas 2009-10 (a) y 2010-11 (b)

En cambio, en 2010-11, se detectaron diferencias significativas entre los T1 y T3 con los T2 y T4. En los T2 y T4, que presentaron deficiencias hídricas en el PC fue afectado negativamente el peso de granos, en cambio en los T1 y T3 sin deficiencias en el PC, el peso promedio de grano fue mayor.

En el segundo año de estudio, la radiación solar incidente fue superior, sin embargo, el peso de grano en el T1 fue inferior al obtenido en el primer año, esto se explicó porque este componente del rendimiento es residual, es decir se determina posteriormente a que se fijó el número de granos. Por lo tanto, cuando el número de granos fijados es elevado, los fotoasimilados para la etapa de llenado de granos pueden no ser suficientes para obtener un peso de grano alto. En el segundo año, se logró en el T1 y T3 un alto número de granos m^{-2} , por ese motivo fue afectado en

forma negativa el peso de grano promedio, en relación al obtenido en el año anterior, dada la residualidad con que definió este componente del rendimiento.

Estos resultados confirman la extensa información que indica que el rendimiento en grano no se relaciona en forma directa con el peso promedio de grano y sí con el número de granos por superficie, siendo este último el principal componente del rendimiento en soja (Kantolic y Slafer, 2003).

3.6. CONCLUSIONES

Las deficiencias hídricas impuestas en el PC (R4–R6) provocaron disminuciones significativas en los rendimientos de soja, se cuantificaron pérdidas de grano que variaron entre 44 y 50%, las reducciones del rendimiento por deficiencias en las ENC previas al PC fueron de 23%.

El estrés hídrico durante el PC provocó menor acumulación de MS afectando negativamente la tasa de crecimiento del cultivo en dicha etapa y el principal componente del rendimiento es decir el número de granos por m⁻². En las ENC las deficiencias provocaron disminuciones en la acumulación de MS sin afectar significativamente el número de granos.

Si bien el tamaño de parcela fue reducido, los rendimientos logrados sin deficiencias hídricas son prometedores, en el primer y segundo año de estudio se duplicaron y triplicaron respectivamente los obtenidos en el país mayoritariamente en condiciones de secano.

Las reducciones de rendimiento constatadas por deficiencias hídricas en el PC y los rendimientos obtenidos sin deficiencias avalan estudios futuros sobre diferentes estrategias de manejo del agua de riego en soja.

3.7. BIBLIOGRAFÍA

- Açıkgöz E, Sincik M, Wietgreffe G, Sürmen M, Çeçen S, Yavuz T, Erdurmuş C, Göksoy AT.** 2013. Dry matter accumulation and forage quality characteristics of different soybean genotypes [En línea]. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 37(1): 22 - 32. Consultado 2 setiembre 2013. Disponible en: <http://journals.tubitak.gov.tr/agriculture/issues/tar-13-37-1/tar-37-1-2-1204-58.pdf>.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M.** 1998. Crop evapotranspiration : Guidelines for computing crop water requirements. Roma : FAO. (Irrigations and Drainage ; 56). 300p.
- Altamirano A, Da Silva H, Durán A, Echeverría A, Panario, D, Puentes R.** 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay : Tomo I: Claificación de suelos. Montevideo : MAP.
- Andrade FH, Aguirrezábal LAN, Rizzalli RH.** 2000. Crecimiento y rendimiento comparados. En: Andrade FH, Sadras VO. [Eds.]. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires : Editorial Médica Panamericana. pp. 61 - 96.
- Andrade FH, Sadras VO.** 2000. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. En: Andrade FH, Sadras VO. [Eds.]. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires : Editorial Médica Panamericana. pp:173-206.
- Andrade FH, Cirilo A, Uhart S, Otegui ME.** 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. Balcarce : La Barrosa, INTA Balcarce, FCA UNMP, Dekalbpress. 292p.
- Andrade FH, Ferreira M.** 1996. Reproductive growth of maize, sun flower and soybean at different source levels during grain filling. *Field Crops Research*, 48: 155 - 165.
- Andrade FH.** 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Research*, 41: 1 - 12.
- Andriani JM.** 2000. Consumo de agua de los cultivos en el Sur de Santa Fe. *Para Mejorar la Producción*, 13: 27 - 30.

- Andriani JM, Andrade FH, Suero EE, Dardanelli JL 1991.** Water deficits during reproductive growth of soybeans : I. Their effects on dry matter accumulation, and its components. *Agronomie*, 11: 737 – 746.
- Baigorri H, Croatto D.** 2000. Manejo del cultivo de soja en Argentina. Marcos Juarez : INTA. 96p.
- Boyer JS.** 1982. Plant productivity and enviroment. *Science*, 218: 443 - 448.
- Cárcova J, Borrás L, Otegui ME.** 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en maíz. En: Satorre EH, Benech RL, Slafer GA, de la Fuente EB, Miralles DJ, Otegui ME, Savin R. [Eds.]. Producción de granos: Bases funcionales para su manejo. Buenos Aires Argentina. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires (U.B.A). pp.133 - 163.
- Cooper RL.** 2003. A delayed flowering barrier to higher soybean yields. *Field Crops Research*, 82: 27 – 35.
- Egli DB, Meckel L, Phillips RE, Radcliffe D, Leggett JE.** 1983. Moisture stress and N redistribution in soybean. *Agronomy Journal*, 75: 1027 - 1031.
- Fehr WR, Caviness CE.** 1977. Stages of soybean development. Ames : Iowa State University. 11p. (Special Report ; 80).
- Flannery R.** 1983. Soybean Research Yields top 118 bu/A. *Bettters Crops with Plant Food*, 68: 6 - 7.
- García H, Ferrarotto M.** 2009. Efecto del déficit hídrico sobre la acumulación de biomasa y nitrógeno en soja (Glicine Max) inoculada con Bradirhizobium japonicum [En línea]. *Revista Facultad Agronomía (UCV)*, 35(1): 21 - 27. Consultado 21 de agosto 2012. Disponible en: http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_agro/article/view/130/108.
- Giménez L, García Petillo M.** 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 15(2): 100 - 108.
- Hall A, Lemcoff J, 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.

INASE, INIA. 2013. Resultados experimentales de la evaluación nacional de cultivares de soja : Período 2012. [En línea]. Consultado 3 de setiembre 2013. Disponible en: http://www.inia.org.uy/convenio_inase_inia/Evaluacion_CV/Ano2012/PubSoja2012.pdf

Kantolic A, Slafer G. 2003. Número de granos en soja y la sensibilidad al fotoperiodo en etapas reproductivas. En: Satorre EH, Benech RL, Slafer GA, de la Fuente EB, Miralles DJ, Otegui ME, Savin R. [Eds.], Producción de granos : Bases funcionales para su manejo. Buenos Aires : U.B.A. pp. 186 - 187.

Kantolic A, Giménez PI, de la Fuente EB. 2003. Ciclo ontogénico, dinámica de desarrollo y generación del rendimiento y la calidad de soja. En: Satorre EH, Benech RL, Slafer GA, de la Fuente EB, Miralles DJ, Otegui ME, Savin R. [Eds.], Producción de granos : Bases funcionales para su manejo. Buenos Aires : U.B.A. pp. 165 - 201.

Korte LL, Specht JE, Williams JH, Sorensen RC. 1983. Irrigation of soybean genotypes during reproductive ontogeny : II. Yield components responses. *Crops Science*, 23: 528 - 533.

Lawn RJ, Troedson RJ, Garside AL, Byth DE. 1984. Soybeans in saturated soil : A new way to higher yields. En: World Soybean Research Conference III. Ames : Iowa State University. pp. 67 - 68.

Momen NN, Carlson RE, Shaw RH, Arjman O. 1979. Moisture-stress effects on the yield components of two soybean cultivars. *Agronomy Journal*, 71: 86 - 90

Pandey RK, Herrera EAT, Pendleton JW. 1984. Drought response of grain legumes under irrigation gradient : II. Plant water status and canopy temperature. *Agronomy Journal*, 76: 553 – 557.

Salvagiotti F. 2009. Manejo de soja de alta producción. *Para mejorar la producción*, 42: 57 - 62.

Sawchik J, 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. Montevideo: INIA. (Actividades de Difusión; 417). pp. 41 - 45.

Serraj R, Sinclair T, Purcell L. 1999. Symbiotic N₂ fixation response to drought. *Journal Experimental Botany*, 50(331): 143 – 155.

Setiyono TD, Weiss A, Specht j, Bastidas AM, Cassman KG, Dobermann A. 2007. Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high-yield conditions. *Field Crops Research*, 100: 257 - 271.

Sinclair TR, Serraj R. 1995. Dinitrogen fixation sensitivity to drought among grain legume species. *Nature*, 378: 344

4. RESPUESTA DEL MAÍZ Y LA SOJA A DIFERENTES DISPONIBILIDADES HÍDRICAS EN DISTINTAS ETAPAS DE DESARROLLO³

Giménez L.*

*Departamento de Producción Vegetal. Estación Experimental Mario A. Cassinoni. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Ruta 3, km 363, 60000 Paysandú, Uruguay. Correo electrónico: kapoexe@fagro.edu.uy

4.1. 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. M.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 periodo 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 claves: deficiencias hídricas, etapas de desarrollo, cultivos de verano, agua

³ Publicado: Agrociencia (Uruguay). 2017. 21 (2): 77-90

4.2. 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. M.A. Cassinoni" Experimental Station, of the Agronomy Faculty, located in Paysandú, Uruguay, during 2011 and 2012 seasons. The main objective was to quantify the impact of water deficiencies on corn and soybeans 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

4.3. INTRODUCCIÓN

En la agricultura del país 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 (MGAP-DIEA, 2016).

En los últimos años en maíz y soja se han realizado transformaciones tecnológicas significativas, las 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 et al., 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 Siglo 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 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 (Kantolic et al., 2003). Esta característica provoca 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 la 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 el cual el potencial de producción es menor en soja que en maíz y que los valores de eficiencia de uso de la radiación sean mayores en el cereal (Cárcova et al., 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, esto provoca distintos costos metabólicos (Cárcova et al., 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 (Dreccer et al., 2003).

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 de los mismos, 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, la misma 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; Giménez, 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.

4.4. 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 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-eutríco 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 del 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 realizado 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 5.1i RR del GM V.

Cuadro 1. Propiedades físicas e hidráulicas del suelo del campo experimental de riego Estación "Dr. M.A. Cassinoni"

Profundidad de horizonte (m)	Textura (%)			Contenido hídrico del suelo cm ³ 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

Las parcelas estuvieron compuestas por 5 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 previo a la siembra. En soja se realizaron dos aplicaciones de herbicida glifosato por temporada a razón de $1,5 \text{ L ha}^{-1}$ 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 posteriores a 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

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) intercepción 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 contruidos en estructuras de acero y 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 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: $\Delta S = PP \text{ efectiva} + R \text{ efectivo} - ET_c$, 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 ET_c (mm) fue calculada diariamente de la siguiente manera $ET_c = ET_o \times K_c$, siendo ET_o 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 ET_o 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, el riego total y efectivo, en cada tratamiento y 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.

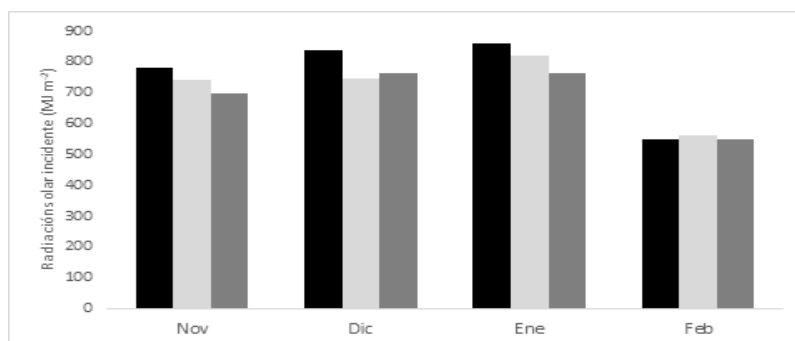


Figura 1. Radiación solar (MJ m^{-2}) mensual para los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero de las temporadas: 2011 (columnas negras), 2012 (columnas grises claro) y serie histórica 1988 - 2012 (columnas grises oscuro).

Cuadro 2. Precipitaciones totales y efectivas y riegos totales y efectivos para las temporadas 2011 y 2012, en los diferentes tratamientos evaluados en maíz

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	268	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	162	132	146
T5	698	671	328	415	-	-	-	-

Cuadro 3. Precipitaciones totales y efectivas y riegos totales y efectivos para las temporadas 2011 y 2012, en los diferentes tratamientos evaluados en soja

Temporadas Tratamiento	Precipitaciones totales (mm)		Precipitaciones efectivas (mm)		Riego total (mm)		Riego efectivo(mm)	
	2011	2012	2011	2012	2011	2012	2011	2012
T1	674	552	251	256	371	304	334	274
T2	498	429	308	266	262	178	236	160
T3	632	513	258	221	162	223	146	201
T4	324	444	215	256	54	153	49	138
T5	674	552	373	399	-	-	-	-

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, 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. El diseño experimental utilizado en los cuatro ensayos fue bloques completamente aleatorizados, ajustándose el modelo $Y_{ij} = \mu + t_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$ donde: μ es la media general, t 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 m^{-2} , PG promedio y biomasa de la parte aérea, se realizaron análisis de varianza considerando los efectos de tratamientos, 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.

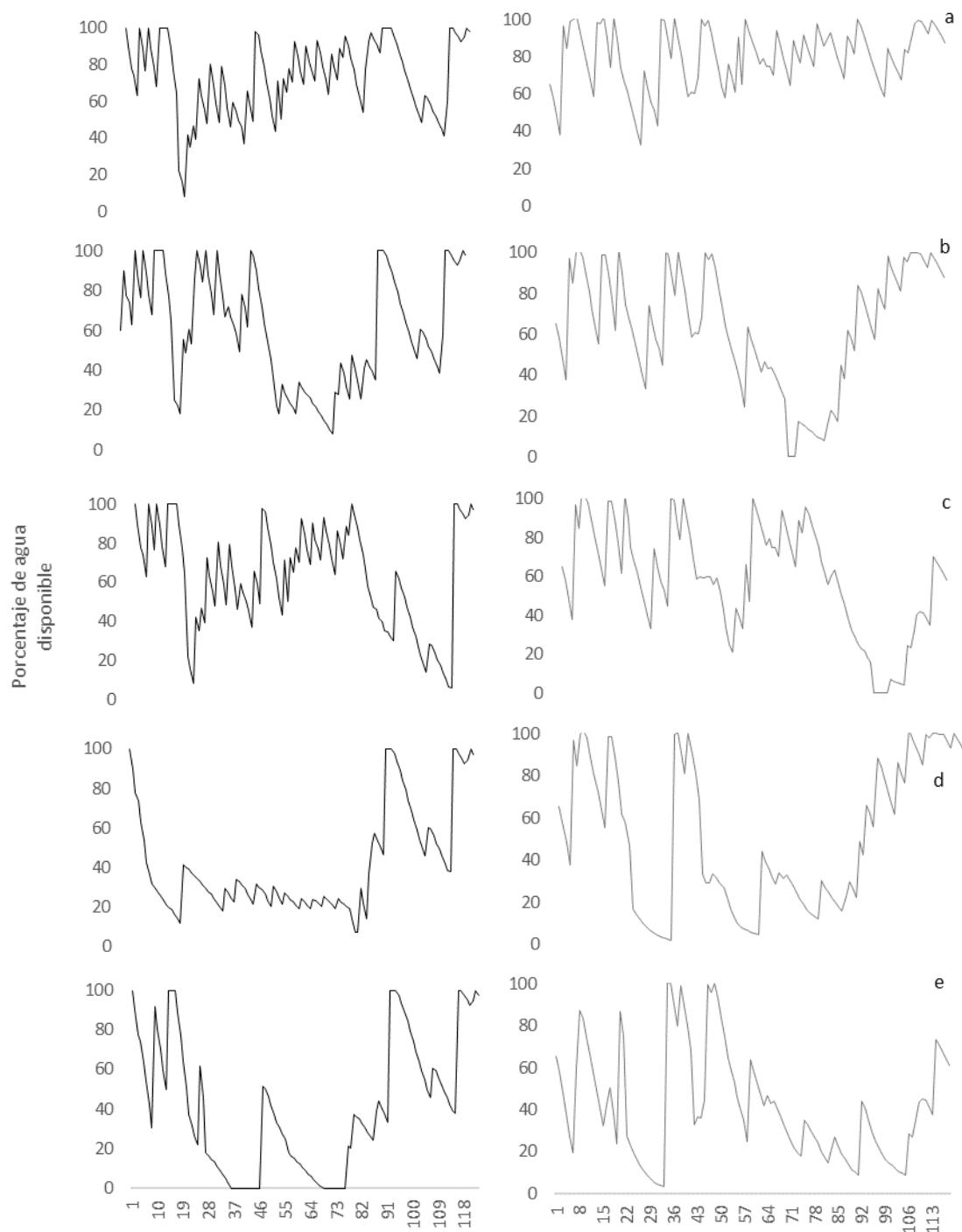


Figura 2. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD) de maíz, en líneas negras la temporada 2011 y en líneas grises la temporada 2012 para los tratamientos evaluados: a) bienestar hídrico (T1), b) deficiencias hídricas en el entorno de la floración (T2), c) deficiencias hídricas en el llenado de grano (T3), d) deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y el entorno de floración (T4) y e) seco (T5).

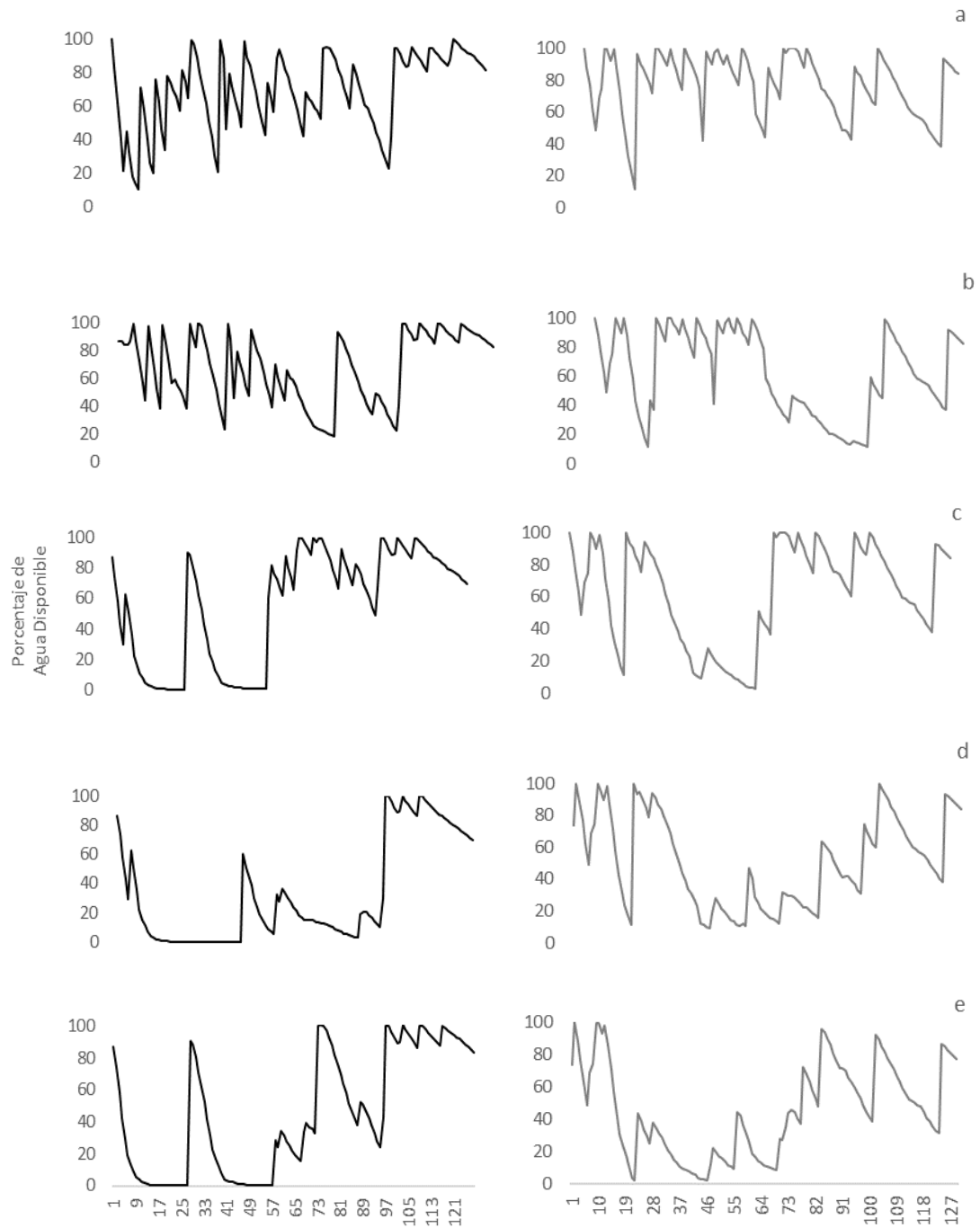


Figura 3. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD) de soja, en líneas negras la temporada 2011 y en líneas grises la temporada 2012 para los tratamientos evaluados: a) bienestar hídrico (T1), b) deficiencias hídricas entre las etapas R4-R6 (Fehr y Caviness, 1977; T2), c) deficiencias hídricas desde la etapa vegetativa hasta R3 (T3), d) deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y el llenado de grano (T4) y e) secano (T5).

4.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.5.1. 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 $14,6 \text{ t ha}^{-1}$ 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 la que correlaciona positivamente con la RS incidente (Cárcova et al., 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 logrados 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 et al., 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.

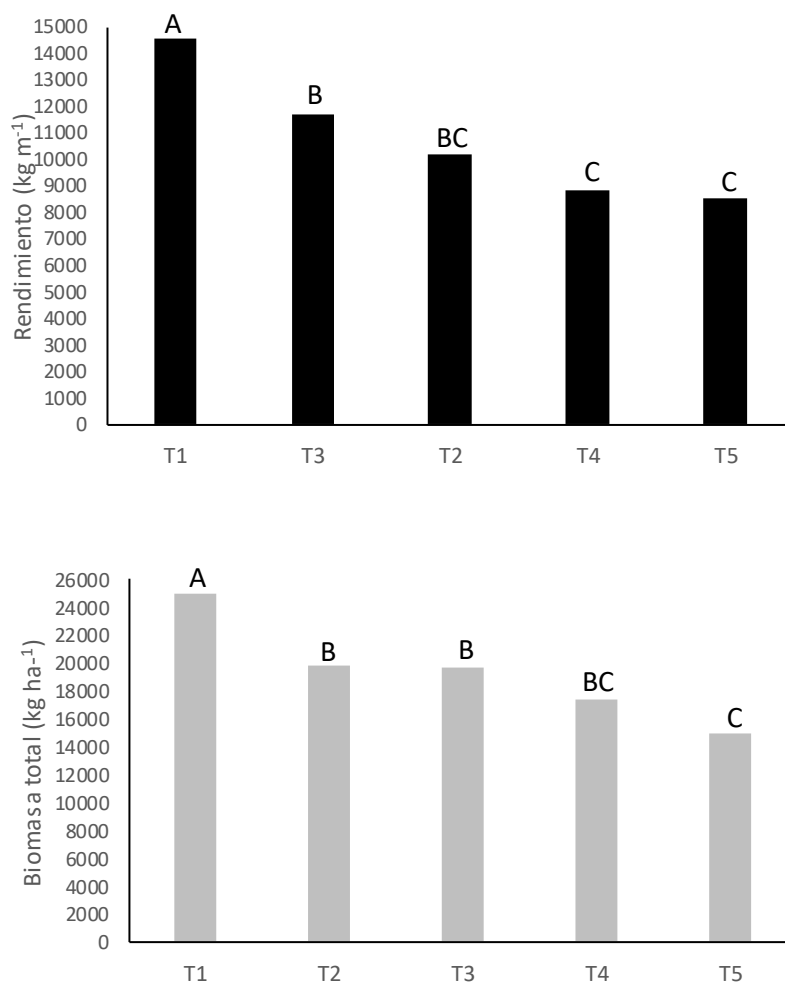


Figura 4. Rendimiento (kg ha⁻¹) y biomasa total (kg ha⁻¹) promedios para las temporadas 2011 y 2012, en los tratamientos de maíz evaluados: T1= bienestar hídrico, T2= deficiencias hídricas en el periodo crítico, T3= deficiencias hídricas en el llenado de grano, T4= deficiencias hídricas en la etapa vegetativa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

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. Asimismo, 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 los 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 si 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 et al., 1987).

Los tratamientos en secano (T5) presentaron los menores rendimientos y las producciones de biomasa más bajas, sin embargo, en ambos parámetros no 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 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 menor NG que el potencial y es posible que posteriormente en la etapa de llenado de grano, la disponibilidad de fotoasimilados 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 periodo crítico, T3= deficiencias hídricas en el llenado de grano, T4= deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y el periodo crítico y T5= secoano.

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 ($P \leq 5\%$).

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, 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 en la etapa de llenado de granos se define principalmente el PG que como componente residual del rendimiento 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 y 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, la que posibilitó 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 escasa importancia del PG en el rendimiento.

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 m^{-2} y el mismo no se compensa por un PG alto. El T1 mostró PG intermedios, 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 en las plantas durante la etapa de llenado de grano. En el T5 el PG varió 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).

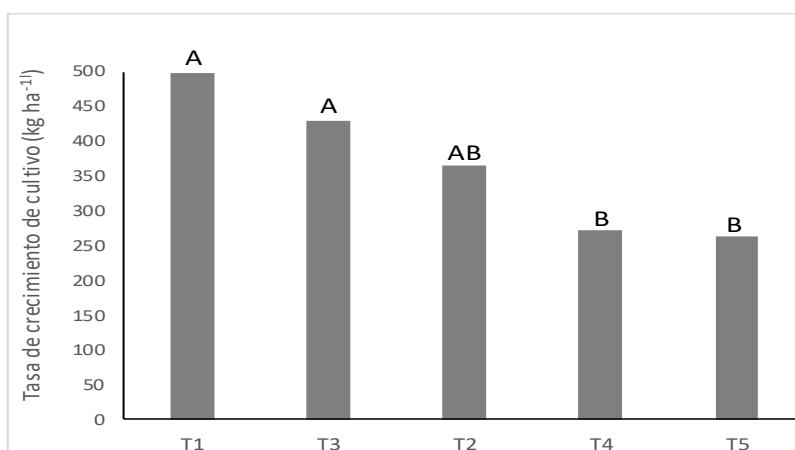


Figura 5. Tasa de crecimiento de maíz ($kg\ ha^{-1}$) de materia seca en el periodo crítico (PC) de determinación del rendimiento promedio para las temporadas 2011 y 2012, en los tratamientos evaluados: T1= bienestar hídrico, T2= deficiencias hídricas en el periodo crítico, T3= deficiencias hídricas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

4.5.2. 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 $6,2 \text{ t ha}^{-1}$ aproximadamente. El T1 presentó el mayor 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 $6 \text{ a } 8 \text{ t ha}^{-1}$. 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 $13,7 \text{ t ha}^{-1}$, esta diferencia se infiere que fue debido 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 de 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 $1,4 \text{ t ha}^{-1}$ 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 provocó que el cultivo a partir de la mitad del PC presentó 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.

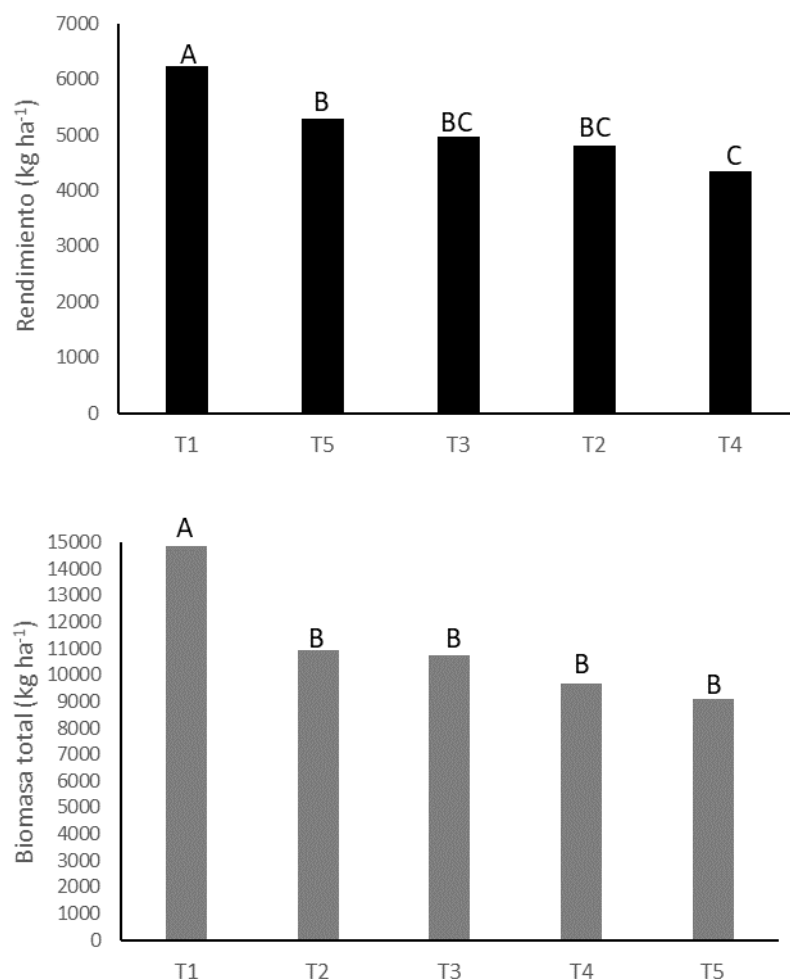


Figura 6. Rendimiento (kg ha⁻¹) y biomasa aérea total (kg ha⁻¹) de soja promedio para las temporadas 2011 y 2012 en los tratamientos evaluados: T1= sin deficiencias hídricas, T2= deficiencias hídricas en el periodo crítico, T3=deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y desde R1 a R3, T4= deficiencias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

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 $1,2 \text{ t ha}^{-1}$, implicando pérdidas de 20% en relación al T1. Las pérdidas del rendimiento del T4 con deficiencias acumuladas en la etapa vegetativa y el PC fueron de $1,9 \text{ t ha}^{-1}$ aproximadamente y las disminuciones porcentuales de 30% en referencia al T1. Las disminuciones del 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 del rendimiento son máximas.

En el T5 las diferencias en rendimiento con el T1 fueron de $0,9 \text{ t ha}^{-1}$ 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} más elevado y diferencias significativas con los restantes tratamientos evaluados y 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.

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 periodo crítico, T3=deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y desde R1 a R3, T4= deficiencias hídricas en etapa vegetativa y el periodo crítico y T5= secoano.

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 ($P \leq 5\%$).

Por el contrario, en el T2 y en el T4 con deficiencias hídricas durante el PC, fueron significativos los efectos negativos en la fijación del NG. 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 m⁻², 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 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 m⁻² 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, la misma es menor que cuando las deficiencias ocurren entre R4 y R6, por ello esta etapa es el periodo 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 fue mencionado anteriormente, en ambas temporadas las PP fueron relativamente elevadas permitiendo obtener rendimientos altos en secano.

4.6. CONCLUSIONES

El bienestar hídrico durante todo el ciclo permitió rendimientos en maíz de $14,6 \text{ t ha}^{-1}$ y en soja de $6,2 \text{ t ha}^{-1}$, promedio para ambas temporadas. 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% y 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 provocó 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.

4.7. BIBLIOGRAFÍA

- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M.** 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO. 300p. (Irrigations and Drainage; 56).
- Andrade FH, Cirilo A, Uhart S, Otegui ME.** 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. Balcarce : La Barrosa, INTA Balcarce, FCA UNMP, Dekalbpress. 292p.
- Andriani JM, Andrade FH, Suero EE, Dardanelli JL** 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans. I. Their effects on dry matter accumulation, and its components. *Agronomie*. 11: 77–746.
- Arbeletche P, Coppola M, 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 WE, Terra R.** 2011 El riego en un clima cambiante. En 1er Seminario Internacional Potencial del riego Extensivo en Cultivos y Pasturas. Grupo de Desarrollo de Riego. pp. 7-18.
- Çakir 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, Prieto C.** 2013. Estudio del efecto de las deficiencias hídricas sobre el rendimiento de soja. Tesis Ing. Agr. Facultad de Agronomía. Universidad de la República.
- Cárcova J, Borrás L, Otegui ME.** 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en maíz. En: Satorre EH, Benech RL, Slafer GA, de la Fuente EB, Miralles DJ, Otegui ME, Savin R. (eds.): Producción de granos: Bases funcionales para su manejo. Buenos Aires Argentina. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires (U.B.A). pp.133-163.
- Castaño JP, Giménez A, Ceroni M, Furest J, Ahunchaina R.** 2011. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009. Serie Técnica N° 193. INIA. ISBN: 978-9974-38-330-2. Montevideo.
- Cooper RL.** 2003. A delayed flowering barrier to higher soybean yields. *Field Crops Research* 82: 27 – 35.

- Dreccer MF, Ruiz RA, Maddoni GA, Satorre EH.** 2003. Bases ecofisiológicas de la nutrición en los cultivos de grano. En: Satorre EH, Benech RL, Slafer GA, de la Fuente EB, Miralles DJ, Otegui ME, Savin R. (eds.): Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. Facultad de Agronomía. U.B.A. Argentina. pp.481- 557.
- Fehr, WR, Caviness CE.** 1977. Stages of soybean development. Special Report 80, Cooperative Extensión Service, Agricultura and Home Economics Exp. Stn Iowa Statae University, Ames Iowa. 11: 929-931
- Fischer KS, Palmer FE.** 1984. Tropical maize. In: Goldsworthy PR, Fischer NM (eds). The physiology of tropical field crops. Wiley pp 213-248.
- 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.** 2012. Producción de maíz con estrés hídrico provocado en diferentes etapas de desarrollo. Agrociencia (Uruguay). 16 (2): 92 - 102.
- Giménez L, García Petillo M.** 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. Agrociencia (Uruguay). 15 (2):100-108.
- Grant RB, Jckson B, Kiniry J, Arkin G.** 1989. Water deficit timing effect on yield components in maize. Agronomy Journal 81:61-65.
- Hall A, Lemcoff J, 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.
- Kantolic A, Giménez PI, de la Fuente EB.** 2003. Ciclo ontogénico, dinámica de desarrollo y generación del rendimiento y la calidad de soja. En: Satorre EH, Benech RL, Slafer GA, de la Fuente EB, Miralles DJ, Otegui ME, Savin R. (eds.): Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. Facultad de Agronomía. U.B.A. Argentina. pp. 165-201.
- Mazzilli SR, Kemanian AR, Ernst OR, Jackson RB, 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 Biochemistry 85:22–30.

- MGAP-DIEA** (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca-Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2016. ENCUESTA AGRÍCOLA “INVIERNO 2016”. Serie de Encuestas 337. (En línea) Consultado noviembre 2016. Disponible en: https://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/encuesta_agricola_invierno_2016.pdf
- Molfino J, Califra A.** 2001. Agua disponible en las tierras del Uruguay : Segunda aproximación. División Suelos y Aguas. Dirección General de Recursos Naturales Renovables. MGAP. Montevideo: MGAP. 12p.
- Ouattar S, Jones RJ, Crookston RK.**1987. Effect of water deficit during grain filling on the pattern of maize kernel growth and development. Crop Science, 27: 726-730.
- Ritchie SW, Hanway JJ.** 1982. How a corn plant develops. Iowa State University. Special report 48.
- Salvaggiotti F, Cassman KG, Specht JE, Walters DT, Weiss A, Dobermann A.** 2008 Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. Field Crops Research. 108:1-13.
- Sawchik J, Cerretta S.** 2005. Consumo de agua por soja de distinto grupo de madurez en diferentes ambientes de producción. En: Jornada Técnica de cultivos: Trabajos presentados. Montevideo: INIA. (Actividades de Difusión; 417). pp. 41 - 45.
- Trout T, Bausch W.** 2012. Water production functions for Central Plains Crops. (En línea). Proceedings of the 24th Annual Central Plains Irrigation Conference, Colby, Kansas, February 21-22, 2012. Consultado 23 de agosto 2015. Disponible en: <https://www.ksre.k-state.edu/irrigate/oow/p12/Trout12.pdf> .
- Uruguay Siglo XXI.** 2015. Informe de comercio exterior. Informes mensuales. Exportaciones e importaciones de Uruguay Julio 2015. (En línea). Consultado 7 julio de 2016. Disponible en: <http://www.uruguayxxi.gub.uy/informacion/wp-content/uploads/sites/9/2015/08/Informe-de-comercio-exterior-Julio-2015-Uy-XXI.pdf>.
- Westgate ME, Boyer JS.** 1985. Carbohydrate reserves and reproductive development at low leaf water potentials in maize. Crop Science, 26:951-956.

5. EVALUACIÓN DEL MODELO AQUACROP EN MAÍZ EN EL LITORAL DE URUGUAY BAJO DIFERENTES DISPONIBILIDADES HÍDRICAS**

Giménez L.*

*Departamento de Producción Vegetal. Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Ruta 3, km 363, 60000 Paysandú, Uruguay. Correo electrónico: kapoexe@fagro.edu.uy

5.1. RESUMEN

El modelo de crecimiento y producción de cultivos de FAO Aquacrop (AQ) fue evaluado utilizando cuatro experimentos de manejo de agua en maíz durante las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012, en el litoral oeste de Uruguay. El modelo fue calibrado en situación de bienestar hídrico, basado en observaciones de la cobertura del canopeo (CC), rendimiento y biomasa; en principio se utilizaron los parámetros por defecto propuestos y luego se ajustaron el coeficiente de crecimiento del canopeo (CGC), el coeficiente de declinación del canopeo (CDC) y la productividad del agua normalizada (WP*). Los resultados de la calibración permiten simulaciones ajustadas del rendimiento y la biomasa. Los valores obtenidos de los indicadores estadísticos utilizados fueron: raíz del error cuadrático medio (RMSE)=841 y 2085 kg/ha, raíz del error cuadrático medio normalizada (NRMSE)= 6,9 y 8,7%, “d” Willmott=0,93 y 0,96 y error absoluto promedio (MAE)=762 y 1568 kg/ha, para el rendimiento y la biomasa respectivamente. Los resultados permiten concluir que AQ simuló ajustadamente bien ambas variables. Posteriormente, con los parámetros calibrados, se intentó validar el modelo en situaciones de deficiencias hídricas y secano. Los resultados de la validación mostraron diferencias mayores entre los valores observados y simulados. En el caso de las deficiencias hídricas provocadas en el entorno de la floración, durante el llenado de granos y deficiencias acumuladas en la etapa vegetativa y el entorno de la floración, el modelo simuló con errores ambas variables. En secano, con temporadas hídricamente diferentes, AQ estimó bien el rendimiento y la biomasa cuando las lluvias fueron abundantes y el cultivo no presentó deficiencias hídricas. Por el contrario, en las temporadas con estrés hídrico severo en determinadas etapas alternando con etapas del ciclo con bienestar hídrico, el modelo estimó con grandes errores la biomasa y el rendimiento. Los resultados

** No publicado

sugieren que en situaciones de deficiencias hídricas los coeficientes de estrés utilizados por AQ requieren ajustes en maíz.

Palabras claves: simulación, agua cultivos, producción de grano, déficit hídrico

5.2. SUMMARY

FAO Aquacrop (AQ) crop growth and production model was evaluated for maize using four water management experiments during 2009, 2010, 2011 and 2012 seasons on the west littoral coast of Uruguay. The model was calibrated in a situation of water well-being, based on soil canopy cover (CC), yield and biomass observations; at first, the proposed default parameters were used, and then the canopy growth coefficient (CGC), the canopy decline coefficient (CDC) and the normalized water productivity (WP *) were adjusted. The calibration results allow for tight performance and biomass simulations. The statistical indicators values obtained for yield and biomass were, respectively: root mean square error (RMSE) = 841 and 2085 kg / ha, normalized root mean square error (NRMSE) = 6.9 and 8.7%, "d" Willmott = 0.96 and 0.99 and mean absolute error (MAE) = 762 and 1568 kg / ha. The results allow concluding that AQ simulated well both variables. Afterwards, with the calibrated parameters, the model was validated in situations of water and rainfall deficiencies. The results of this validation showed greater differences between the observed and the simulated values. In the case of water deficiencies caused around flowering, during the grain filling stage, and accumulated deficiencies in the vegetative stage and around flowering, the model simulated with errors both variables. In rainfed crops, with different hydric conditions seasons, AQ estimated well yield and biomass when the rainfall were abundant and the crop presented no water deficiencies. On the contrary, in seasons with severe water stresses in certain stages, alternating with water well-being cycle stages, the model estimated with great errors both biomass and yield. The results suggest that in water deficiencies situations, the stress coefficients used by AQ require adjustments for maize.

Keywords: simulation, water, crops, grain production, water deficit

5.3. INTRODUCCIÓN

Los cultivos de verano poseen la mayor superficie sembrada en Uruguay y a su vez una elevada relevancia en las exportaciones del país (Uruguay Siglo XXI, 2016), se siembran más de 1,3 Mha (MGAP-DIEA, 2016) y la principal limitante ambiental que explica la variabilidad de los rendimientos interanual es la disponibilidad de agua (Sawchik y Ceretta, 2005; Andersen et al., 2001; Giménez y García Petillo, 2011). Sin embargo, la mayor parte de la superficie de siembra de los cultivos estivales se realiza en secano. La capacidad de almacenamiento de agua (CAAD) de los suelos agrícolas es baja, en relación con el consumo potencial de los cultivos y cubre sólo entre 20 y 30% aproximadamente del agua necesaria (Giménez y García Petillo, 2011). Las demandas atmosféricas en verano son elevadas y las recargas de los suelos se realizan exclusivamente por las precipitaciones (PP) que presentan una alta variabilidad (Baethgen y Terra, 2010). El maíz es uno de los cultivos de verano que por sus características morfo-fisiológicas posee una gran sensibilidad a las deficiencias hídricas principalmente en el entorno de la floración (Andrade et al., 1996), asimismo el llenado de granos es una etapa del ciclo en la que se determina el peso del grano, el estrés hídrico en esta etapa provoca disminuciones significativas del rendimiento (Giménez 2012; Cakir 2004).

La disponibilidad de agua para riego no presenta actualmente grandes limitantes en el país (FAO-AQUASTAT, 2015), sin embargo, el riego suplementario es escasamente utilizado por diferentes motivos, entre los que se destacan los elevados costos energéticos (Bachino, 2012), éste es uno de los argumentos principales que impide una mayor adopción del riego, particularmente en el maíz. A través del riego tradicionalmente se buscó la obtención de rendimientos potenciales, cubriendo las necesidades totales de agua de los cultivos. Sin embargo, en situaciones de costos energéticos elevados, las estrategias de riego deficitario (RD) y riego deficitario controlado (RDC) son alternativas que permiten mejorar la eficiencia del uso del agua (Ferreeres y Soriano, 2007) y disminuir los costos directos del riego.

Por otra parte, los modelos que simulan adecuadamente la productividad de los cultivos con diferentes manejos del agua son herramientas que colaboran en mejorar la planificación del riego. Es posible evaluar la disminución de los costos energéticos

al utilizar manejos del agua alternativos a satisfacer la demanda completa de los cultivos durante todo el ciclo, y con ello aportar conocimientos para mejorar la adopción del riego, principalmente en maíz debido a la sensibilidad a la disponibilidad hídrica en diferentes etapas del ciclo. De todas maneras, es imprescindible la evaluación local de los modelos y estudiar su adaptación en diferentes situaciones de disponibilidad de agua.

El modelo Aquacrop (AQ) de FAO (Steduto et al., 2009) fue propuesto para simular la producción de biomasa y rendimiento en diferentes cultivos, bajo distintas estrategias de riego, incluyendo el RD (Hsiao et al., 2009) y condiciones de secano (Raes et al., 2009). El modelo hace foco en el agua y muestra como ventaja la necesidad de utilizar un número escaso de parámetros y a su vez es de baja sofisticación, esto permite la aplicabilidad en un amplio espectro de usuarios (Raes et al., 2009). El objetivo principal de este trabajo fue evaluar el desempeño de AQ en maíz en el litoral de Uruguay, en diferentes situaciones de disponibilidad hídrica: riego completo, RDC y secano.

5.4. MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo fue parametrizado en experimentos de maíz realizados para estudiar el efecto de las deficiencias hídricas sobre el rendimiento desarrollados en el campo experimental de riego de la Estación Experimental “Dr. M.A. Cassinoni” de la Facultad de Agronomía, ubicada en Paysandú (32° 22' S y 58° 03' W), durante las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012. El suelo del campo experimental es un Brunosol sub-éutrico típico (Fine, thermic, superactive, mixed, Pachic Argiudoll). El laboreo realizado en ambos experimentos fue de tipo convencional. Las características hidrológicas principales del suelo se muestran en el cuadro 1.

Cuadro 1. Propiedades físicas e hidráulicas del suelo del sitio experimental

Horizonte profundidad (m)	Tamaño de partícula (%)			Contenido de agua (cm ³ cm ⁻³)		
	Arena	Limo	Arcilla	Capacidad de campo	Punto de marchitez permanente	Agua disponible (mm)
0 – 0,2	31,0	46,5	22,5	0,3	0,14	32
0,2 – 0,6	25,3	39,2	35,5	0,4	0,26	56
0,6 – 0,75	22,2	40,4	37,4	0,32	0,18	21

En el cuadro 2 se presentan las temperaturas máximas, mínimas, la radiación solar mensual promedio, la evapotranspiración de referencia (ET_o) y las precipitaciones mensuales, durante la estación de crecimiento de las temporadas estudiadas.

Los ensayos fueron sembrados el 27, 22, 29 y 27 de octubre de 2009, 2010, 2011 y 2012, respectivamente, y cosechados el 2 de marzo, 28 de febrero, 13 de marzo y 28 de febrero de 2010, 2011, 2012 y 2013, respectivamente. El híbrido utilizado fue DK 692 de ciclo intermedio, caracterizado por presentar alto potencial de rendimiento en la evaluación de cultivares nacionales.

Las parcelas presentaron 5 m de longitud y 3,5 m de ancho y estuvieron compuestas por 5 surcos y una distancia entre hileras de 0,7 m. La población objetivo fue de 100000 plantas ha⁻¹ la que se logró en las cuatro temporadas. El control químico de malezas se realizó con una mezcla de los herbicidas Atrazina y Dual Goal, en dosis de 1,5 l ha⁻¹ de producto comercial de cada herbicida, aplicados en pre siembra.

Los tratamientos en los que se realizó la calibración y validación del modelo AQ fueron: T1= sin deficiencias hídricas, T2= deficiencias hídricas en el entorno de la floración (PC), T3= deficiencias hídricas en el llenado de grano, T4= deficiencias en la etapa vegetativa y PC este tratamiento se evaluó en 2010, 2011 y 2012 ya que en 2009 no se logró instalar y T5= secano.

Los T1, T2, T3 y T4 fueron establecidos mediante dos tipos de intervenciones: a) riego suplementario y b) intercepción de las PP a través de la colocación de simuladores de sequía en los tratamientos con deficiencias hídricas. El riego se realizó por goteo, con cintas con goteros cada 0,2 m y un caudal/gotero de 1,49 l h⁻¹, se aplicó de acuerdo a la variación del porcentaje de agua disponible (AD), estimado a través de un balance hídrico de suelos simplificado de paso diario, realizado hasta 0,7 m, considerada la mayor profundidad de arraigamiento.

Cuadro 2. Temperaturas máximas, mínimas promedio mensual y del ciclo; radiación solar promedio mensual y total del ciclo, evapotranspiración de referencia y precipitaciones totales mensuales y totales del ciclo.

	Temporada	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Promedio
Temperatura máxima del aire, (°C)								
2009		24	27,1	27,6	30,8	28,4	28,8	28,6
2010		22,7	27,3	31,5	32,2	28,9	28,5	29,6
2011		21,8	28,5	29,6	33,4	29,4	26,5	29,9
2012		Sd	28,5	29,7	29,2	28,5	25,5	28,7
Temperatura mínima del aire, (°C)								Promedio
2009		10,8	16,9	17,3	19,2	19,1	17	18
2010		10,3	13,4	17,3	20,1	18,1	16,4	16,9
2011		16,6	15,5	15,9	18,8	19,3	16,2	17,5
2012		sd	16,2	17,9	18,6	17,2	13,9	17,7
Radiación solar (MJ m ⁻² día)								Total
2009		23,5	19,4	22,6	26,1	18,4	19,8	2788
2010		21,2	26,3	26,3	24,8	22,4	20,2	3523
2011		18	26	27	27,7	20,5	18,4	3368
2012		sd	24,6	24,1	26,4	21,6	18,4	3008
ET _o , (mm)								Total
2009		170	126	133	165	106	120	482
2010		137	172	202	177	133	144	662
2011		103	169	186	202	129	121	683
2012		95	152	142	165	135	108	584
Precipitaciones totales, (mm)								Total
2009		94	351	289	265	690	194	1549
2010		71	39	79	137	211	55	442
2011		205	124	48	67	368	91	698
2012		382	42	448	52	131	137	671

Las variaciones del contenido de agua en el suelo fueron calculadas mediante la expresión: $\Delta S = PP + R - ET_{act}$, siendo: ΔS = variación de AD (mm), R= riego (mm) y ET_{act} = evapotranspiración de cultivo actual (mm), calculada como $ET_{act} = ET_o \times K_c \times K_s$, siendo ET_o la evapotranspiración de referencia (mm), estimada utilizando la ecuación de FAO P-M (Allen et al., 1998), K_c = coeficiente de cultivo, se

utilizaron los propuestos por FAO y K_s = coeficiente de estrés, utilizando para su cálculo la fórmula propuesta por FAO (Allen et al., 1998) donde $K_s = AD - D_r / AD(1-p)$, siendo D_r = el agotamiento de humedad en la zona radicular (mm), es decir el agua faltante en relación a la capacidad de campo y “p” es la fracción del AD que el cultivo puede extraer sin que ocurra déficit hídrico. Los “p” utilizados fueron 0,4 AD en el PC y 0,6 AD en las etapas no críticas (ENC).

En el cuadro 3 se muestra el riego efectivo y la $ET_{C_{act}}$ para cada tratamiento y temporada evaluada. Los parámetros climáticos para estimar la ET_o fueron medidos a través de una estación meteorológica automática Vantage Pro 2TM, modelo 6510 (Davis Instruments, Hayward, CA), ubicada aproximadamente a 2000 m del sitio experimental. En los tratamientos con bienestar hídrico, el inicio del riego durante los PC ocurrió cuando el agua en el suelo descendió de 60% y en las ENC cuando fue inferior a 40% AD, a la profundidad radicular 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 40% de AD en las ENC y hasta 60% de AD durante el PC.

Cuadro 3. Evapotranspiración ajustada (ET_c act) en mm y riego efectivo en cada tratamiento y temporada.

$ET_{C_{act}}$ (mm)	Temporada	T1	T2	T3	T4
	2009	457	371	447	443
	2010	600	432	529	294
	2011	614	468	590	272
	2012	542	434	464	364
Riego efectivo, mm	2009	158	33	112	0
	2010	401	252	330	0
	2011	385	221	356	0
	2012	354	211	230	0

Los simuladores de sequía para interceptar las PP fueron contruidos en acero con cubiertas de lona impermeable, las dimensiones fueron de 3,5m x 5m x 2,5m de altura máxima. Los simuladores fueron colocados inmediatamente antes de cada

evento de PP y retirados inmediatamente después, intentando no modificar sustancialmente las condiciones de radiación solar y temperatura.

En cada tratamiento, se midió la biomasa total y el rendimiento en 9 m lineales de los tres surcos centrales de cada parcela, y además se determinó el número de granos m^{-2} y el peso de granos. En los tratamientos de bienestar hídrico en 2009 y 2011 se midió el IAF a través de un ceptómetro Decagon AccuPar LP 80 y fue transformado a cobertura de canopeo (CC) a través de la ecuación empírica propuesta por Hsiao et al. (2009) donde $CC = 1,005(1 - \exp(-0,6 \times \text{IAF}))^{1,2}$. El diseño experimental fue de bloques completamente aleatorizados, se realizaron ANOVAS y contrastes para comparar los tratamientos evaluados, se utilizó el test de Tukey en un nivel de significación de 5%. Los análisis fueron realizados mediante el paquete estadístico SAS v.9.2.

Aquacrop es un modelo de crecimiento de cultivos que calcula la biomasa y el rendimiento considerando la transpiración real del cultivo (T_a , mm) separada de la evaporación del suelo (E_s). La ET_c real diaria ($ET_{c_{act}}$, mm día⁻¹) se calcula como la suma de T_a y E_s , siendo: $T_a = K_s \times CC \times K_{c,Trx} E_{To}$ (1) $E_s = K_r (1 - CC) K_e \times E_{To}$ (2). Donde E_{To} es la evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹), $K_{c,Trx}$ es el coeficiente de transpiración estándar máximo (no dimensional), o coeficiente máximo de cultivo basal cuando $CC=100\%$; CC es la cobertura real del canopeo (%); K_s (0-1) es el coeficiente de estrés hídrico; K_e es el coeficiente de evaporación del suelo para la superficie del suelo completamente húmeda y no sombreada (no dimensional) y K_r (0-1) es el coeficiente de reducción de la evaporación (Raes et al., 2012). Por lo tanto, el cálculo de los dos componentes ET se vincula principalmente a la simulación de la CC.

El modelo combina cuatro sub-modelos: (1) el balance hídrico del suelo (2) el desarrollo, el crecimiento y el rendimiento del cultivo (3) la atmósfera, las precipitaciones, la demanda evaporativa atmosférica a través de la E_{To} y la concentración de CO_2 ; (4) el manejo del cultivo que incluye riego y fertilización (Raes et al., 2012).

La biomasa (B , t ha⁻¹) es estimada por el modelo utilizando el agua transpirada por el cultivo en la estación de crecimiento y la productividad del agua normalizada (WP^* ,

g m⁻²). La WP* representa la biomasa producida por unidad de superficie considerando la transpiración acumulada, después del ajuste por la concentración atmosférica de CO₂ y la ETo (Raes et al., 2012). El rendimiento del cultivo (Y, t ha⁻¹) se calcula como: $Y = fHI \cdot HI_o \cdot B$ (3). El HIo es el índice de cosecha de referencia, que indica la proporción de biomasa en los granos y fHI es un factor de ajuste que integra cinco factores de estrés hídrico relativos al crecimiento foliar, el cierre de estomas, la reducción de la biomasa debido al estrés antes de la antesis y fallas en la polinización (Raes et al., 2012).

La CC en AQ es un parámetro fundamental equivalente a la fracción de suelo cubierto por el canopeo. El modelo no permite el uso de datos para construir la curva CC, pero si permite calibrar la curva CC. Los cálculos de la CC se realizan a través de tres fases (Raes et al., 2012): la primera utiliza una función exponencial del tiempo, que comienza en la emergencia del cultivo y termina cuando se alcanza la mitad de la CC máxima y la tasa de crecimiento de CC definida por el parámetro CGC. La segunda fase utiliza otra función exponencial hasta que se alcanza la máxima CC (CCx), con la forma de la curva dada por el mismo parámetro CGC. La última fase se refiere a la disminución de la cobertura del canopeo después del inicio de la senescencia y la forma de la curva se define por el parámetro CDC, Raes et al., 2012. Para parametrizar las curvas CC es decir encontrar los CCx, CGC y CDC con mejor adaptación a los valores observados de biomasa y rendimiento, se pueden utilizar valores de IAF observados para calcular los valores CC a través de una función planteada por Hsiao et al., 2009.

Los datos de entrada del modelo (Raes et al., 2012) incluyen:

- (1) Datos meteorológicos diarios sobre temperaturas máximas y mínimas del aire (°C), PP totales (mm) y ETo (mm). Los datos atmosféricos se refieren a la concentración anual de CO₂.
- (2) Datos de cultivo que refieren a: i) las fechas de siembra, fecha en que se alcanza la cobertura máxima del canopeo, fecha en que se alcanza la profundidad radicular máxima, fecha de inicio de la senescencia y fecha de la madurez, (ii) valor máximo KcTr, (iii) profundidad de raíz mínima y máxima Zr (m) y factor de forma de expansión de las raíces iv) cobertura inicial y máxima de la cubierta vegetal (CCo,

CCx), CGC y CDC; (v) ajuste de la productividad del agua WP*; (vi) índice de cosecha de referencia (HIo) (vii) coeficientes de estrés hídrico relativos a la expansión del canopeo, cierre estomático, senescencia temprana del canopeo y estrés de aireación.

(3) Datos del suelo para un suelo con cinco horizontes máximo. Para cada horizonte los datos se requiere profundidad del horizonte (m), capacidad de campo (m^3m^{-3}), punto de marchitez permanente (m^3m^{-3}), contenido a saturación (m^3m^{-3}) y la conductividad hidráulica saturada (Ksat). En relación con el perfil del suelo, el agua fácilmente evaporable (REW, mm) y la curva número (CN).

(4) Datos de riego, fechas y láminas.

(5) Prácticas de manejo de campo relativas a la salinidad, fertilidad del suelo y prácticas de reducción de escorrentía.

La calibración del modelo en maíz se realizó con los tratamientos de bienestar hídrico de los experimentos de las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012. El proceso de calibración se inició corriendo el modelo con los parámetros conservativos propuestos por Hsiao et al. (2009). Luego con base en las observaciones del CC se ajustaron los parámetros que dan la forma a la curva de CC es decir CGC y CDC. Posteriormente se ajustó la WP* por medio de un proceso fino de prueba y error con el objetivo que las diferencias entre los valores observados y simulados de biomasa y rendimiento fueran los mínimos posibles.

En este estudio Aquacrop fue evaluado estadísticamente con cinco índices, utilizados para medir la calidad de ajuste de los modelos de simulación, los que se detallan a continuación:

1) La raíz del error cuadrático medio (RMSE) que expresa la varianza de los errores residuales, los valores varían entre 0 y $+\infty$ y cuya fórmula es:

$$RMSE = \frac{\sqrt{(\sum (O_i - S_i)^2)}}{n}$$

siendo O_i los valores observado y S_i los valores simulados.

2) La RMSE normalizada (NRMSE) que se define como la relación entre RMSE y el valor medio de las observaciones se expresa en porcentaje y cuya fórmula es:

$$NRSME = \frac{RMSE}{\bar{O}}$$

3) El índice “d” de Willmott (1982), el valor puede variar en un rango entre $-\infty$ y 1, el modelo tiene el mejor ajuste cuando el índice es cercano a 1 y se considera un mal ajuste cuando los valores de “d” son negativos.

$$d = 1 - \frac{\sum (Si - Oi)^2}{\sum (|Si - \bar{O}| + |Oi - \bar{O}|)^2}$$

4) El error absoluto medio (MAE) que expresa el tamaño medio de los errores estimados.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Oi - Si|$$

5) El coeficiente de regresión (b) que si es cercano a 1 indica que los valores simulados son estadísticamente cercanos a los observados.

$$b = \frac{\sum Oi \times Si}{\sum Oi^2}$$

5.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.5.1 Calibración de Aquacrop

En el cuadro 4 se presentan los parámetros conservativos y no conservativos utilizados en la calibración de AQ en maíz, incluyendo los ajustes realizados en CGC y CDC que dan forma a la curva CC, se muestra también el valor de la WP* ajustado, en los tratamientos con bienestar hídrico de las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012. Los valores obtenidos de los coeficientes para la calibración de la curva CC fueron: CGC=13,8%/d y para CDC=1,081%/GD y de la WP*=34 gr/m². Los parámetros calibrados presentaron valores cercanos a los propuestos por Hsiao et al., 2009 en la calibración inicial de AQ en maíz. En el caso de la WP* se ajustó el mismo valor que el logrado por Abedinpour et al., 2012. En cambio, los valores obtenidos en CGC y CDC son superiores a los indicados por Paredes et al. (2014) para maíz, es posible que esta respuesta de ajuste de los parámetros CGC y CDC posea cierta dependencia de las condiciones locales de temperaturas y radiación, ya que son los factores que controlan el desarrollo y el crecimiento del cultivo respectivamente, en ausencia de deficiencias hídricas y nutritivas. En los restantes parámetros conservativos, se utilizaron los valores propuestos en la calibración

inicial (Hsiao et al., 2009). En el cuadro 4 se muestran el conjunto de parámetros conservativos y no conservativos utilizados en la calibración del modelo.

Cuadro 4. Parámetros conservativos y no conservativos utilizados en la calibración de Aquacrop para maíz

Parámetros conservativos	
Temperatura base	8° C
Temperatura máxima	30 °C
Cobertura del cultivo a 90% de emergencia, cco	0.50%
Coeficiente de crecimiento de la cobertura cultivo, CGC	13,8%/día
Coeficiente de declinación de la cobertura del cultivo, CDC	1,08%/GD
Cobertura máxima del cultivo, CCx	90%
Coeficiente de declinación de la cobertura de cultivo después de alcanzar CCx	0,3%
Coeficiente de transpiración de cultivo a 100% CC	1,10
Productividad del agua normalizada, WP*	34 g/m ²
Límite de crecimiento de hoja (“p” por encima)	0,14
Límite de crecimiento de hoja (“p” por debajo)	0,72
Coeficiente de estrés para expansión del cultivo	2,9
Límite de conductancia estomática (“p” por encima)	0,69
Coeficiente de estrés estomático forma curva	6
Coeficiente de estrés para la senescencia (“p” por encima)	0,69
Coeficiente de estrés para la senescencia forma de la curva	2,7
Parámetros considerados conservativos pero dependientes de la variedad	
Índice de cosecha de referencia (Hlo)	0,50
Parámetros no conservativos	
Densidad de plantas	100000 pl/ha ⁻¹
GD para la máxima cobertura de cultivo	700
GD a floración	820
GD de floración	150
GD a senescencia	990
GD a madurez	1290
Profundidad radicular máxima (m)	0,7
Profundidad radicular mínima efectiva (m)	0,3

En la figura 1 se muestran los valores observados y simulados de la curva de CC en las temporadas 2009 (a) y 2011 (b), con los parámetros CGC y CDC ajustados en el proceso de calibración. La curva de CC es un aspecto clave en el funcionamiento de AQ, ya que el modelo estima la transpiración del cultivo a través de la CC y la transpiración a su vez es utilizada para el cálculo de la biomasa total. En el mismo

sentido Abedinpour et al., 2012, lograron buenas estimaciones de la CC en maíz bajo condiciones de disponibilidad hídrica ajustada a los requerimientos de maíz y sin restricciones de nitrógeno.

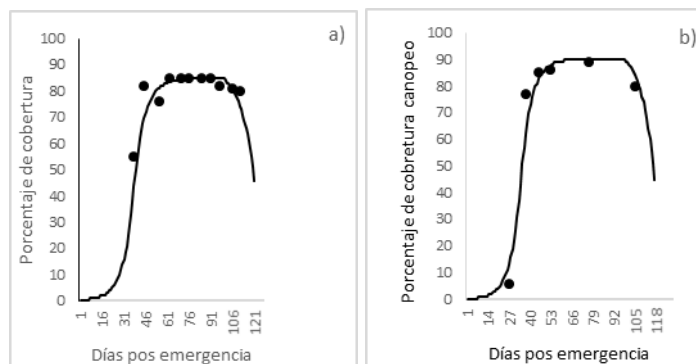


Figura 1. Valores simulados por Aquacrop (línea) y observados (marcadores) del canopeo de cultivo(CC) en los tratamientos con bienestar hídrico de las temporadas 2009 (a) y 2011 (b).

En la figura 2 se presentan los valores observados y simulados por AQ de biomasa aérea total (a) y el rendimiento (b). En ambas variables se constató un buen ajuste entre los valores medidos y simulados.

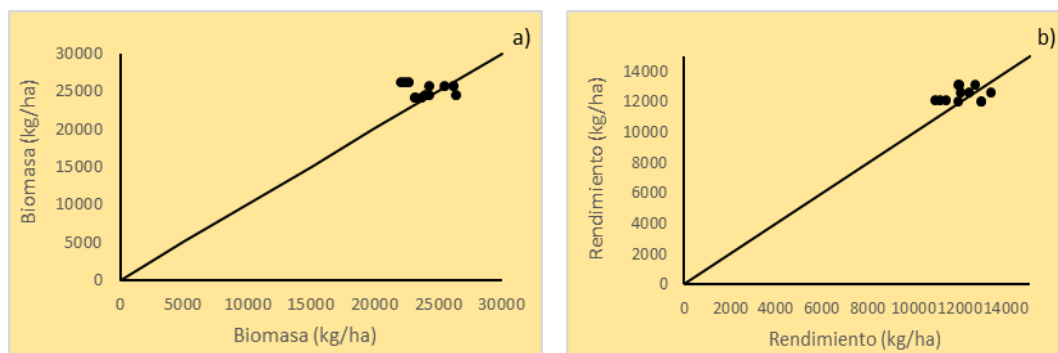


Figura 2. Relación entre los valores observados y los simulados por Aquacrop en biomasa (a) rendimiento (b) en los tratamientos con bienestar hídrico de los experimentos de las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012.

En el cuadro 5, se muestran los indicadores estadísticos utilizados para evaluar la performance del modelo en la calibración. La CC fue bien simulada por AQ, en las temporadas 2009 y 2011 en las que fue medida, la NRMSE presentó valores inferiores a 7%, se considera excelentes simulaciones cuando este indicador es inferior a 10%, el indicador de concordancia “d” presentó un valor de 0,99 y el mejor resultado para este indicador es 1. En el caso de la biomasa y el rendimiento, los

indicadores estadísticos utilizados para evaluar la modelación mostraron que ambas variables fueron bien simuladas por AQ en las cuatro temporadas, en condiciones de bienestar hídrico.

En la figura 3 se muestra el contenido de agua en el suelo simulado por el modelo en los T1 en las cuatro temporadas y las mediciones de agua realizadas en los mismos tratamientos. Se puede observar la congruencia entre los valores medidos y estimados en la mayoría de las mediciones de agua realizadas. Esto justifica las buenas estimaciones que AQ realizó de la biomasa total y el rendimiento, ya que para el modelo la disponibilidad hídrica es el aspecto clave para la estimación de la biomasa y el rendimiento.

Cuadro 5. Raíz cuadrada media del error (RMSE), raíz cuadrada media del error normalizada (NRMSE), índice de concordancia de Willmott (“d”), error absoluto medio (MAE) y coeficiente de regresión (b), para los valores observados y simulados de biomasa, rendimiento y cobertura de canopeo, en la calibración de Aquacrop.

	RMSE	MAE	NRMSE	“d” Willmott	b
	kg/ha		%		
Biomasa	2085	1568	8,7	0,99	1,04
Rendimiento	841	762	6,9	0,96	1,02
	%		%		
CC 2009	7,2	6,6	0,09	0,9	1
CC 2011	4,5	3,1	0,1	0,99	0,97

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede concluir que los ajustes realizados en los parámetros de cultivo CGC, CDC y WP*, propuestos por Hsiao et al. (2009), permitieron simulaciones ajustadas del rendimiento y la biomasa de maíz, en las condiciones hídricas no limitantes en las que fue calibrado el modelo.

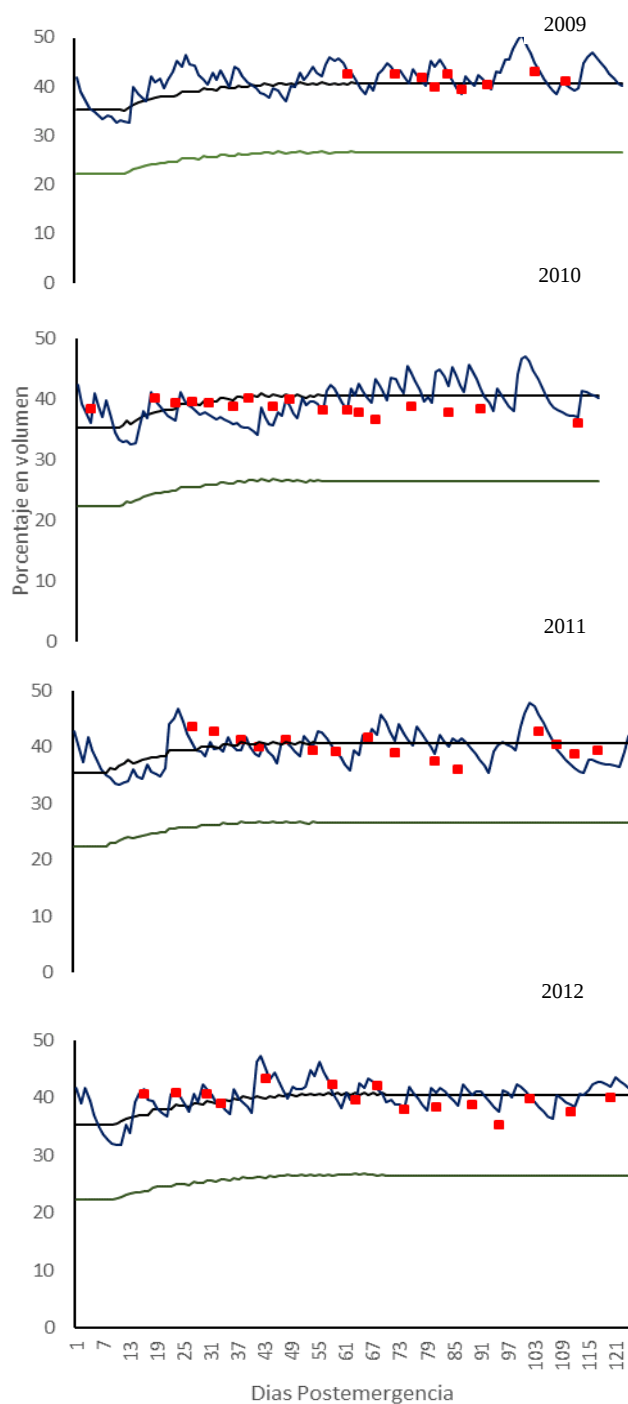


Figura 3. Evolución del agua en el suelo simulada por Aquacrop (línea azul) de los tratamientos con bienestar hídrico (T1) para las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012, mediciones de agua en suelo (marcadores rojos) en los T1 para las mismas temporadas, contenido de agua del suelo a capacidad de campo (línea negra), contenido de agua del suelo en el punto de marchitez permanente (línea verde). Los contenidos de agua están expresados en porcentaje en volumen.

En el mismo sentido, y en regiones diferentes, se constató que, bajo condiciones de no estrés hídrico, el modelo simuló bien la CC, el rendimiento y la biomasa total en maíz (Bitri y Grazhdani., 2015). Además, Abedinpour et al., (2012), agregan que el modelo presentó simulaciones de rendimiento y biomasa, seguras y ajustadas en situaciones de riego completo y cuando el riego cubrió el 75% de la ETc.

5.5.2 Validación de Aquacrop

La validación del modelo se realizó con los tratamientos con deficiencias hídricas provocadas: en el entorno de la floración (T2), en el llenado de granos (T3), en la etapa vegetativa y el entorno de la floración (T4) y en secano (T5). En el cuadro 6 se presentan los valores observados, simulados por AQ y las diferencias entre simulados y observados del rendimiento y la biomasa, en las cuatro temporadas.

En la mayoría de los tratamientos con deficiencias hídricas provocadas (T2, T3 y T4) se constató que el modelo AQ simuló la biomasa y el rendimiento de maíz con errores. En el tratamiento con deficiencias hídricas en el llenado de granos (T3), en las cuatro temporadas, el modelo sobrestimó la biomasa y el rendimiento. Las deficiencias hídricas en el llenado de granos producen el adelantamiento de la senescencia del cultivo, pérdidas tempranas de biomasa, disminución de la cobertura del canopeo y como consecuencia disminuciones del rendimiento a causa del menor peso de grano. Bitri y Grazhdani (2015) y Heng et al. (2009) coinciden en señalar que el modelo AQ no simula bien las deficiencias hídricas severas en las etapas finales del maíz. Las deficiencias hídricas en el llenado de granos provocan pérdidas de rendimiento y biomasa que varían entre 20 y 30% del potencial (Giménez 2012, Cakir 2004). En las simulaciones de AQ realizadas, las pérdidas de rendimiento y biomasa durante el llenado de granos por deficiencias hídricas severas variaron entre 1 y 12%. Los resultados de las simulaciones muestran en forma clara que AQ no posee certeza para modelar los efectos de las deficiencias hídricas en el llenado de granos y por lo tanto no simula bien las disminuciones del rendimiento y la biomasa que se producen en esa etapa.

Cuadro 6. Rendimiento, biomasa total y diferencias (Difer.) entre valores simulados (Sim.) por Aquacrop y observados (Obs.) en los tratamientos: bienestar hídrico (T1), deficiencias hídricas en el entorno de la floración (T2), deficiencias hídricas en llenado de grano (T3), deficiencias hídricas en etapa vegetativa y entorno de la floración (T4) y secano (T5), en las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012.

		Rendimiento (kg ha ⁻¹)			Biomasa (kg ha ⁻¹)		
		Obs.	Sim.	Difer.	Obs.	Sim.	Difer.
2009	T1	11136	12109	-973	23358	24219	-861
	T2	5247	9131	-3884	16046	19320	-3274
	T3	7719	11995	-4276	17450	24010	-6560
	T5	11186	12077	-891	23354	24153	-799
2010	T1	12921	12004	917	25205	24497	708
	T2	6437	2621	3816	15639	14274	1365
	T3	9177	11515	-2338	20143	23625	-3482
	T4	5646	1615	4031	14502	10305	4197
	T5	6392	1395	4997	13143	8744	4399
2011	T1	12905	12584	321	25641	25682	-41
	T2	7722	3261	4461	19831	14726	5105
	T3	9908	11126	-1218	21008	23068	-2060
	T4	7166	157	7009	17679	5189	12490
	T5	6275	740	5535	14096	7189	6907
2012	T1	11816	13068	-1252	24298	26136	-1838
	T2	8584	10231	-1647	19852	21198	-1346
	T3	9607	12744	-3137	18450	25553	-7103
	T4	7736	10215	-2479	17066	21115	-4049
	T5	7696	9816	-2120	15771	20553	-4782

En el caso de las deficiencias hídricas provocadas durante el entorno de la floración (T2), que es el periodo crítico de determinación del rendimiento en maíz, en dos de las temporadas estudiadas AQ sobrestimó el rendimiento y la biomasa y en las otras dos temporadas subestimó ambas variables. Además, se verificó que, en las

temporadas con PP relativamente escasas, el modelo subestimó. En cambio, en las temporadas 2009 con PP abundantes durante todo el ciclo y en 2012 con PP abundantes superiores a 400 mm en las etapas iniciales alternando con deficiencias en otras etapas, AQ sobreestimó ambas variables. En la literatura revisada no se registran antecedentes de evaluación de la performance del modelo, en situaciones con deficiencias hídricas severas, sólo en el entorno de la floración. En maíz ésta es una etapa de desarrollo clave y las deficiencias de agua provocan disminuciones significativas del rendimiento (Giménez 2012, Çakir 2004, Andrade et al.1996). Esto se debe a la fuerte dominancia apical del maíz que en situaciones de estrés induce a que las espigas se encuentren relegadas ante la panoja masculina (Andrade et al., 1996). El estrés hídrico en el entorno de la floración afecta negativamente la viabilidad del número de granos, con la consecuente disminución del rendimiento (Grant et al. 1989, Westgate y Boyer 1986, Hall et al. 1981). Las deficiencias hídricas ubicadas en esta etapa pueden llegar a provocar pérdidas que se sitúan entre 40 y 50% del rendimiento potencial (Giménez 2012, Çakir 2004). En ningún caso evaluado, con deficiencias en el entorno de la floración de maíz las simulaciones de AQ fueron acertadas.

En las temporadas 2010, 2011 y 2012 fueron evaluados los efectos de las deficiencias hídricas acumuladas en la etapa vegetativa y en el entorno de la floración (T4). En este caso, las simulaciones de biomasa y rendimiento de AQ presentaron los errores mayores. Las deficiencias de agua en el T4 fueron las de mayor duración entre las evaluadas, como se observa en el cuadro 6 el modelo mostró en las temporadas 2010 y 2011 subestimaciones fuertes, tanto en la biomasa como en el rendimiento. En cambio, en 2012 los errores en la simulación fueron en sentido inverso, es decir AQ simuló valores superiores de biomasa y rendimiento a los observados. Como ya fue comentado en 2010 y 2011 las PP fueron escasas y en 2012 relativamente abundantes, la tendencia en las simulaciones fue la misma que la encontrada en los T2, es decir en las temporadas con PP escasas las simulaciones subestimaron la biomasa y el rendimiento y en años con PP elevadas, AQ mostró sobreestimaciones en ambas variables.

Los resultados obtenidos en secano muestran distintos niveles de ajuste según la temporada evaluada. La temporada 2009 se caracterizó por PP superiores a 1500 mm durante el ciclo, esto permitió una disponibilidad hídrica elevada en todo el ciclo del cultivo, el modelo mostró un buen ajuste entre los valores simulados y observados de rendimiento y biomasa, igual que ocurrió con bienestar hídrico, confirmando que cuando los requerimientos de agua en maíz son cubiertos, ya sea por riego o por PP, el modelo simula bien el rendimiento y la biomasa.

En cambio, en las temporadas 2010 y 2011, las PP escasas ocurridas durante diciembre 79 y 48 mm respectivamente, y en enero 43 mm hasta el 25 de enero en 2010 y 67 mm en 2011, provocaron deficiencias hídricas significativas, en el entorno de la floración, en secano. En esa situación AQ subestimó el rendimiento y la biomasa respecto a los valores medidos, al igual que ocurrió con los tratamientos con deficiencias provocadas en el entorno de la floración y con deficiencias acumuladas en la etapa vegetativa y la floración, en ambas temporadas. Este comportamiento de AQ de simular bien bajo buena disponibilidad hídrica y presentar errores ante estrés hídrico severo fue constatado y discutido por Greaves y Wang, 2016; Bitri y Grazhdani, 2015; Katerji et al., 2013.

En la temporada 2012, el secano presentó mejores condiciones hídricas que en 2010 y 2011, alternando etapas de buena disponibilidad de agua y etapas con escasez, en esta situación el modelo sobrestimó el rendimiento y la biomasa total.

En el cuadro 7 se muestran los indicadores estadísticos de bondad de ajuste utilizados para evaluar las simulaciones de AQ de biomasa y rendimiento, para los tratamientos con deficiencias hídricas provocadas y secano. Se constató que la RMSE y la NRMSE presentaron valores elevados, la RMSE en todos los casos estuvo muy por encima de 0 que es el valor de ajuste perfecto y la NRMSE superó el 20% considerado el límite para simulaciones ajustadas. Los valores de MAE fueron elevados en todos los casos, y los índices de concordancia “d” de Willmott presentaron valores lejanos de la unidad y el coeficiente de regresión b indicó sobrestimaciones para los T3 y subestimaciones para los T2, T4 y T5, en ambas variables.

Cuadro 7. Raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), raíz cuadrada del error cuadrático medio normalizada (NRMSE), error absoluto medio (MAE), índice de concordancia de Willmott (“d”) y coeficiente de regresión lineal (b), para los tratamientos: deficiencias hídricas en el entorno de la floración (T2), deficiencias hídricas en el llenado de granos (T3), deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y llenado de granos (T4) y secoano (T5), en las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012.

Rendimiento	RMSE (kg ha ⁻¹)	NRMSE (%)	MAE (kg/ha ⁻¹)	“d”	b
T2 (Flor.)	3698	52	3452	0,4	0,87
T3 (Llen. granos)	3397	37	3115	0,39	1,3
T4 Veget. y Flor.)	5026	73	4506	0,41	0,61
T5 (Secano)	3966	50	3415	0,69	0,84
Biomasa					
T2 (Flor.)	3828	21	3349	0,43	0,94
T3(Llen. granos)	5948	31	5474	0,39	1,27
T4 Veget. y Flor.)	5026	73	4506	0,41	0,61
T5 (Secano)	5000	30	4301	0,81	0,94

En la figura 4 se presentan las simulaciones realizadas por AQ de la evolución del contenido hídrico del suelo en la zona radicular, en los tratamientos y temporadas evaluadas. La evolución del agua presentó las tendencias esperadas, tanto en los tratamientos con bienestar hídrico con contenidos de agua elevados en todo el ciclo, como en aquellos con deficiencias hídricas provocadas en distintas etapas. En los secanos el comportamiento fue diferente en cada temporada debido a la irregularidad de las PP.

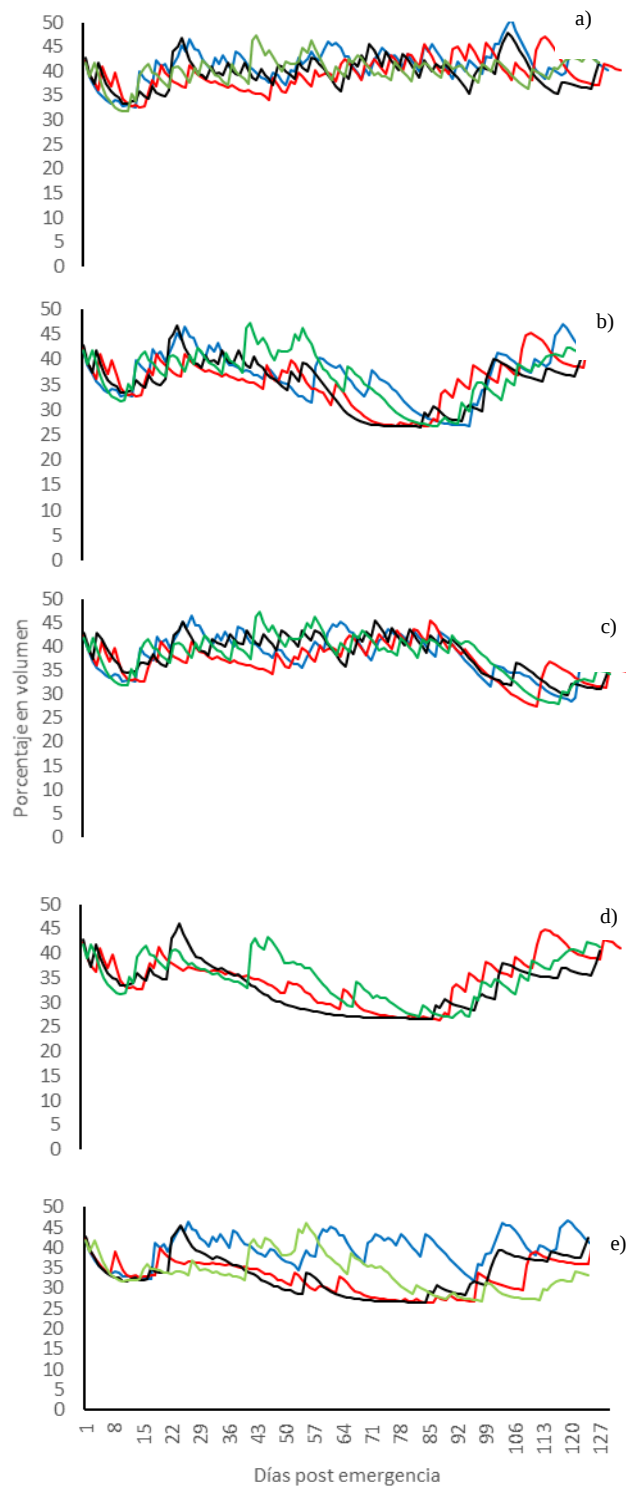


Figura 4. Simulaciones realizadas por el modelo Aquacrop de la evolución del contenido de agua en la zona radicular en el ciclo de maíz en los tratamientos: a) bienestar hídrico (T1), b) deficiencias en el entorno de floración (T2), c) deficiencias en el llenado de grano (T3), d) deficiencias en la etapa vegetativa y floración (T4) y e) secano. En líneas celeste temporada 2009, en líneas rojas 2010, en líneas negras 2011 y en líneas verdes 2012.

En la figura 5 se muestran las simulaciones desarrolladas por AQ de la evolución del agua en el suelo en la temporada 2011, en los tratamientos evaluados y las mediciones de agua en el suelo realizadas.

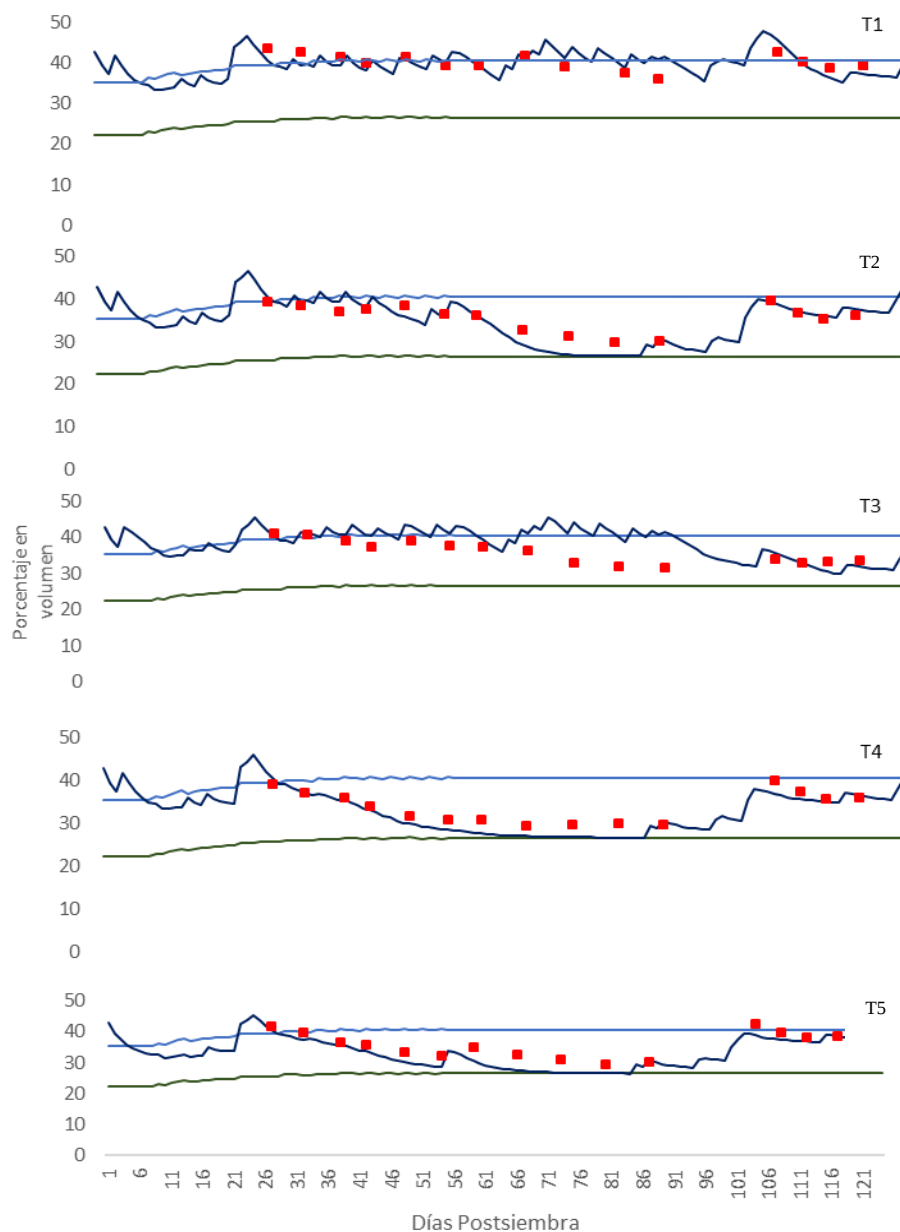


Figura 5. Evolución de agua en el suelo en la zona radicular simulada por Aquacrop (línea azul), mediciones de agua en el suelo realizadas con sonda de neutrones (marcadores rojos), contenido de agua a capacidad de campo (línea celeste), contenido de agua del suelo en el punto de marchitez permanente (línea verde), en la temporada 2011, en los tratamientos con bienestar hídrico (T1), deficiencias hídricas en el entorno de la floración (T2), deficiencias hídricas en el llenado de grano (T3), deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y entorno de la floración (T4) y sequo (T5).

Es claro el buen ajuste que se aprecia entre las simulaciones de AQ y las mediciones de agua en el suelo en la situación de bienestar hídrico. Por otra parte, se constataron los desajustes entre las simulaciones y las mediciones del agua en el suelo, en distintas etapas del ciclo en los tratamientos con deficiencias hídricas provocadas (T2, T3 y T4) y en secano (T5). En los T2 y T4 el modelo simuló el contenido de agua en el suelo por debajo de las mediciones, en la mayor parte de las etapas e incluso simuló con niveles de agua bajos y cercanos al PMP. A su vez en ambos tratamientos en la temporada 2011, como fue indicado el modelo subestimó fuertemente la biomasa y el rendimiento (cuadro 6). En el mismo sentido, Abedinpour et al., 2012; Bitri y Grazhdani, 2015, señalan que en situaciones de deficiencias hídricas severas durante el ciclo del cultivo en las que se cubrió sólo el 50% de la ET_c, encontraron que las simulaciones del rendimiento y la biomasa desarrolladas por AQ en maíz, no se ajustaron a los datos medidos.

En la figura 5 se aprecia en el tratamiento con deficiencias sólo en el llenado de granos (T3) las simulaciones del agua en la zona radicular estuvieron mayormente por encima de las mediciones y el modelo sobreestimó el rendimiento y la biomasa. En el T5 nuevamente el modelo simuló el contenido de agua en el suelo con valores inferiores a las mediciones y a su vez subestimó el rendimiento y la biomasa, como se indicó anteriormente.

En la figura 6 se presenta la relación entre valores observados y medidos de la biomasa total y el rendimiento para el conjunto de los tratamientos con deficiencias hídricas provocadas y secano.

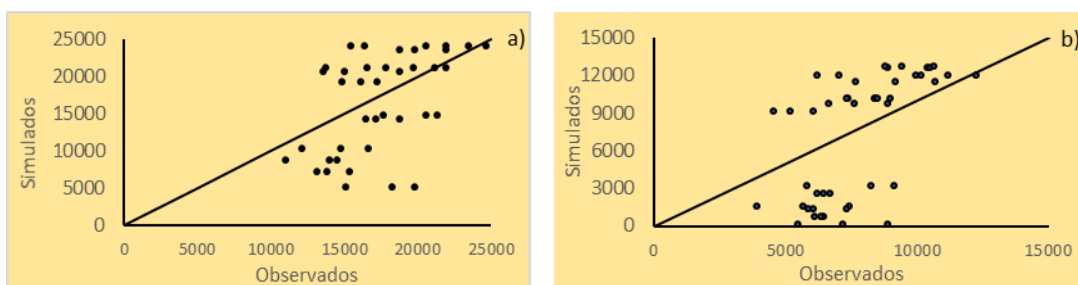


Figura 6: Relación entre valores observados y simulados por Aquacrop de biomasa total (a) y rendimiento (b) para el conjunto de los tratamientos: deficiencias hídricas en el entorno de la floración (T2), deficiencias hídricas en el llenado de grano (T3), deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y entorno de la floración (T4) y secano (T5)

La dispersión de valores observados y simulados demuestra los problemas de AQ para simular bien ambas variables en situaciones de deficiencia hídrica en maíz. De acuerdo a la información presentada en la figura 5 es posible que los errores se deban a problemas en la simulación del agua en la zona radicular cuando existen deficiencias hídricas severas. A partir de los resultados obtenidos interpretamos que el modelo no simula adecuadamente los efectos de las deficiencias hídricas en maíz. Es posible que AQ no presente buenos ajustes de los coeficientes de estrés para deficiencias hídricas severas.

Por otra parte, a partir de los resultados obtenidos en secano, se puede inferir que el funcionamiento del modelo dependió de las características de las PP en cada temporada. En las temporadas en que las PP fueron abundantes y permitieron buena disponibilidad hídrica para la mayor parte del ciclo, AQ realizó simulaciones ajustadas del rendimiento y la biomasa. Por el contrario, cuando las PP fueron escasas y se presentaron deficiencias hídricas severas, las simulaciones mostraron errores en relación con los valores medidos en ambas variables.

5.6. CONCLUSIONES

El modelo AQ fue evaluado durante cuatro años en experimentos de maíz con diferentes disponibilidades hídricas. Luego de los ajustes realizados en el proceso de calibración en los parámetros CGC, CDC y WP*, el modelo mostró buenas predicciones de rendimiento y biomasa en situaciones de bienestar hídrico.

En cambio, en condiciones de deficiencias hídricas en el entorno de la floración, AQ simuló con errores, en las temporadas con PP escasas subestimó el rendimiento y la biomasa, en cambio, en las temporadas con disponibilidades hídricas elevadas sobrestimó los resultados en ambas variables. En las situaciones con deficiencias en el llenado de granos el modelo sobrestimó el rendimiento y la biomasa en las cuatro temporadas. En los tratamientos con deficiencias hídricas acumuladas en la etapa vegetativa y el entorno de la floración, en las temporadas con bajas PP el modelo subestimó fuertemente ambas variables y en la temporada con elevadas PP el modelo sobrestimó.

En secano, los resultados confirmaron el buen funcionamiento de AQ cuando la disponibilidad de agua no es restrictiva, en este caso debido a PP abundantes. Sin

embargo, en las temporadas con deficiencias hídricas el modelo subestimó los valores observados de rendimiento y biomasa. Los resultados obtenidos permiten inferir que AQ no presenta los coeficientes de estrés que utiliza ajustados y que esto produce problemas en la modelación del agua en el suelo que posteriormente se traducen en simulaciones de la biomasa y el rendimiento con errores en situaciones de deficiencias hídricas severas.

5.7. BIBLIOGRAFÍA

Abedinpour M, Sarangi A, Rajput TB, Man Singh, Pathak H, Ahmad, T. 2012. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*. 110: 55-66.

Allen R, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper N° 56. 300p.

Andersen J, Alagarswamy G, Rotz C, Ritchie J, LeBaron A. 2001. Weather impacts on maize, soybean and alfalfa production in the great lakes region. *Agronomy Journal* 93: 1059-1070.

Andrade F, Cirilo A, Uhart S, Otegui ME. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. La Barrosa y Dekalb press. Argentina. 292 pág.

Bachino F. 2012. Análisis de costos y rentabilidades en riego por aspersión. En 2º Seminario Internacional de riego en cultivos y pasturas. Paysandú. Uruguay.pp 83-97

Baethgen WE, Terra R. 2010. El riego en un clima cambiante. In: Seminario Internacional Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (1º, 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Boscana. Montevideo, Uruguay. 7–18.

Bitri M, Grazhdani S. 2015. Performance Evaluation of AquaCrop Model for Irrigated Field Maize in South-eastern Albania. *Journal of International Environmental Application and Sciences* 10 (3): 375-383.

Çakir R. 2004. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research* 8 (1): 1-16.

FAO-AQUASTAT. 2016. Uruguay. (En línea). Consultado 20 de diciembre 2016.

Disponible en: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/wrs/readPdf.html?f=URY-WRS_eng.pdf

- Fereres E, Soriano MA.** 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58 (2), 147–159.
- Giménez L.** 2012. Producción de maíz con estrés hídrico provocado en diferentes etapas de desarrollo. *Agrociencia (Uruguay)* 16 (2): 92-102.
- Giménez L, García Petillo M.** 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)* 15 (2): 100-108.
- Grant R, Jackson B, Kiniry J, Arkin G.** 1989. Water deficit timing effects on yield components in maize. *Agronomy Journal* 81:61-65.
- Hall AJ, Lemcoff JH, 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.
- Heng LK, TC Hsiao, S Evett, Howell T, Steduto P.** 2009. Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize. *Agronomy Journal* 101:488–498
- Hsiao TC, Heng LK, Steduto P, Rojas-Lara B, Raes D, Fereres E.** 2009. AquaCrop—the FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize. *Agronomy Journal* 101:448–459
- MGAP-DIEA** (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca-Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2016. Encuesta agrícola invierno 2016. Serie de Encuestas 337. (En línea). Consultado noviembre 2016. Disponible en: http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/encuesta_agricola_invierno_2016.pdf.
- Katerji N, Campi P, Mastrorilli M.** 2013. Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management* 130: 14-26.
- Nash JE, Sutcliffe e JV.** 1970. River flow forecasting through conceptual models. I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10:282–290.
- Paredes P, de Melo-Abreu JP, Alves I, Pereira LS.** 2014. Assessing the performance of the FAO Aquacrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. *Agricultural*

Water Management 144: 81-97.

Paredes P, Rodrigues GC, Alves I, Pereira LS. 2014. Partitioning evapotranspiration, yield prediction and economic returns of maize under various irrigation management strategies. *Agricultural Water Management* 135: 27-39.

Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agronomy Journal* 101 (3): 438-447.

Sawchik J, Ceretta S. 2005. Consumo de agua por soja de distintos grupos de madurez en diferentes ambientes de producción. In. *Jornada técnica de cultivos de verano. Serie Actividades de Difusión N° 417*, p. 41-45.

Steduto P, Raes D, Hsiao TS. 2009. Concepts and applications of AquaCrop: the FAO crop water productivity model. *Crop Modeling and Decision Support*, 175–191.

Uruguay Siglo XXI. 2016. Informe de comercio exterior. Exportaciones e Importaciones de Uruguay. (En línea). Consultado 20 de julio 2016. Disponible en: <http://www.uruguayxxi.gub.uy/informacion/wp-content/uploads/sites/9/2016/07/Informe-mensual-de-comercio-exterior-Junio-2016.pdf>

Westgate M, Boyer J. 1986. Reproduction at low silk and pollen water potentials in maize. *Crop Science* 26: 951-956.

Willmott CJ. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin American Meteorological Society* 63: 1309-1313.

6. WATER USE AND YIELD OF SOYBEAN UNDER VARIOUS IRRIGATION REGIMES AND HEAVY WATER STRESS. APPLICATION OF AQUACROP AND SIMDUAL K_c MODELS³

Luis Giménez¹, Paula Paredes^{2,*}, Luis Santos Pereira²

¹ Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Paysandú, Uruguay; kapoexe@fagro.edu.uy

² LEAF – Linking Landscape, Environment, Agriculture and Food, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, Portugal; lspereira@isa.ulisboa.pt

* Correspondence: pparedes@isa.ulisboa.pt; Tel.: +351-213653339

6.1 ABSTRACT Data relative to two soybean seasons and several irrigation scheduling treatments, including moderate and heavy deficit irrigation, and rain-fed cropping were used to parameterize and assess the performance of models AquaCrop and SIMDualK_c, the latter combined with the Stewart's yield model. SIMDualK_c applies the FAO56 dual crop coefficient approach for computing and partitioning evapotranspiration (ET) into actual crop transpiration ($T_{c\ act}$) and soil evaporation (E_s), while AquaCrop uses an approach depending upon the canopy cover curve. The calibration-validation of models were performed comparing observed and predicted soil water content (SWC), final above ground biomass and grain yield. SIMDualK_c showed good accuracy for SWC estimations, with normalized errors of estimate $NRMSE \leq 7.6\%$. AquaCrop was less accurate, with $NRMSE \leq 9.2\%$. Differences between models were notable relative to the water balance terms, and the ET partition revealed a trend for under-estimation of $T_{c\ act}$ by AquaCrop, mainly under heavy water stress. Yield predictions with SIMDualK_c-Stewart models produced $NRMSE < 15\%$ while predictions with AquaCrop resulted in $NRMSE \leq 23\%$ due to under-estimation of $T_{c\ act}$, particularly for water stressed treatments. Results show the appropriateness of SIMDualK_c to support irrigation scheduling, including its combination with Stewart's model for assessing impacts on yield, thus to support farmers' irrigation scheduling.

³ Publicado: Water, 2017. 9 (6), 393

Keywords: dual crop coefficient, ET partition, soil water balance, actual transpiration, Stewart's water-yield model, strengths and weaknesses of models, western Uruguay

6.2. INTRODUCTION

Uruguay is characterized by a warm temperate and humid climate, where summer crops are commonly rain-fed cropped. Due to rainfall uncertainty, supplemental irrigation is often required for achieving high yields [1]. Thus, an adequate irrigation scheduling has to be considered for soybean production. Predicting soybean yield response to water is required for assessing irrigation management strategies to be adopted by farmers. Attention should be paid to the crop stages where water stress is mostly critical and several studies identified the period from flowering to grain filling as the most sensitive to water stress [2-4].

Crop growth and yield models are often used. The CROPGRO-Soybean model is probably the most used to simulate soybean growth and yield. It is one of the DSSAT cropping system models (DSSAT-CSM) which features are discussed in detail by Jones et al. [5]. Because DSSAT-CSM are oriented to represent the growth and yield processes with consideration of a variety of constraints and stresses, its use is rarely for assessing water use or developing irrigation scheduling scenarios. However, various applications of CROPGRO-Soybean are reported [6-8]. The RZWQM-CROPGRO hybrid model for soybean production [6] consists of combining the more precise approach to water and solutes dynamics of RZWQM with the accurate prediction of yields of CROPGRO-Soybean, thus resulting a more useful model for practical applications related to water. Another modeling approach consists of model SoySim [9] which testing has been performed for various locations and different crop varieties, growth constraints and cropping practices. Moreover, an accurate comparison with other models was performed: CROPGRO-Soybean [5], Sinclair-Soybean [10] and WOFOST [11]. A recent application of SoySim to yield prediction in Brazil is reported by Cera et al. [12]. Crop growth and yield models are quite complex, require a large number of parameters, and their parameterization is generally difficult and exigent in terms of agronomic data acquisition. Therefore,

these models are generally more adequate for research purposes or for yield prediction than for operational use in support to farmers' irrigation management, and may be less accurate in simulating soil water dynamics and water use; however, as for an application of SOYGRO, these models may be useful to define irrigation schedules [13].

The FAO Aquacrop model [14], a hybrid semi-empiric and deterministic model, is aimed at both crop yield and water use simulation and recently became quite popular likely because it is less exigent in terms of parameterization than models referred above, and because its water module is featured in terms of its use to support water management simulations [15,16]. However, it is much more complex in parameterization than simplified approaches combining a soil water balance model and a water-yield model as in applications combining the SIMDualKc water balance model with the Stewart's water-yield model [17,18] as reported by Paredes et al. [19,20] and by Pereira et al. [21].

Applications the Stewart's model are often reported in literature aiming at easing the assessment of irrigation scheduling impacts on yields [22-25], which have different and less requirements relative to above referred crop growth and yield models. The Stewart's model linearly relates the relative yield loss $(1 - Y_a/Y_m)$ with the relative ET deficit $(1 - ET_{c\ act}/ET_c)$ through the water-yield response factor K_y , where the actual and potential yields (Y_a and Y_m) are produced when ET are respectively the actual and potential crop ET ($ET_{c\ act}$ and ET_c). A modified version of the Stewart's model, where $(1 - ET_{c\ act}/ET_c)$ is replaced by the relative transpiration deficit $(1 - T_{c\ act}/T_c)$, was successfully reported for cereals [19,21] and grain legumes [20,26], with actual and potential transpiration ($T_{c\ act}$ and T_c) computed with the water balance SIMDualKc model, which partitions ET and daily computes $T_{c\ act}$. Considering that SIMDualKc has already been calibrated and proved well in various applications worldwide, and that AquaCrop acceptably predicted soybean yields in southern Brazil [27], the objectives of the present study consisted of: (1) parameterizing and testing the AquaCrop model for different water management treatments; (2) calibration and validation of the SIMDualKc model for the same treatments; (3) analyzing soybean water balance terms and evapotranspiration partition with both the AquaCrop and the SIMDualKc models; (4)

assessing the accuracy of the AquaCrop model and of the Stewart's water-yield model combined with SIMDualKc to predict soybean yields under various water stress conditions; and (5) assessing strengths and weaknesses of both modelling approaches aimed at supporting irrigation management.

6.3. MATERIAL AND METHODS

6.3.1. Site characterization description of the experiments

Field experiments were developed during the soybean cropping seasons of 2009-10 to 2012-13 in an Experimental Station at Paysandú, western Uruguay (32° 22' S, 58° 4' W, and 50 m elevation). Data for 2009-10 and 2010-11 were incomplete, lacking adequate soil water observations that could be used for models testing or validation; nevertheless, data were appropriate for soybean yield assessments. The average annual temperature was 18.3 °C during the period 1993-2014 and the average annual precipitation of 1327 mm, however with large inter-annual variability due to impacts of the El Niño Southern Oscillation [28] and the Pacific Decadal Oscillation [29]. Local climate is warm temperate, with humid and hot summers, Cfa according to the Köppen-Geiger classification [30]. Weather daily data including maximum and minimum air temperature (°C), solar radiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), air relative humidity (%), wind speed (m s^{-1}), and precipitation (mm) were collected with an automatic meteorological station (Vantage Pro 2TM, Davis Instruments, USA) located near the experimental fields. These data were used to compute daily reference evapotranspiration (ET_0) with the FAO-PM method [31]. The variability of daily rainfall and ET_0 during the soybeans crop seasons is given in Fig. A1.

The soil in the experimental fields is a Eutric Cambisol, loamy in the top layer and clay loamy underneath. The total available water (TAW), which represents the difference between the water storages in the root zone at field capacity (33 kPa) and permanent wilting point (1500 kPa), is 176 mm and 144 mm respectively for soil types 1 and 2. Main soil hydraulic properties are presented in Table A1. The soil water content (SWC) was measured with a calibrated neutron probe (503DR HYDROPROBE, InstroTek Inc., USA). Measurements were performed at each 0.10 m until a maximum of 1.00 m. Soil sampling was used for the upper 0.10 m. Plots were cropped with the

soybean variety “Don Mario 5.1i RR” (maturity group V) that is of indeterminate growth and has high yield potential. Each plot was 5 m x 2 m, with five rows spaced 0.4 m. The plant density was 30 plants m⁻². Cropping practices were those recommended locally by the extension services. The irrigation system consisted of pressure compensating in-line drippers spaced 0.20 m and discharging 1.5 l h⁻¹. Irrigations were scheduled by daily performing a simple soil water balance applied to a depth of 1.0 m using the computed ET_o and the measured (SWC) data. The irrigation trigger was a depletion of 60% of TAW during periods when water stress was induced, and a depletion of 40% of TAW otherwise.

The following treatments were adopted:

- a) FI, full irrigation, aimed at fully satisfying crop water requirements, thus to avoid water stress in all crop growth stages;
- b) DI_{GFill}, deficit irrigation during the flowering to grain filling periods;
- c) DI_{Veg}, deficit irrigation during the vegetative period;
- d) DI_{Veg-GFill}, deficit irrigation during the vegetative to the grain filling periods;
- e) Rain-fed.

Water deficits were induced by withholding irrigation or precipitation at above referred crop periods using rain shelters to allow that water deficits could be induced at desired timings in the crop season. Three replications of the referred five irrigation treatments were adopted. Completely random blocks were used. To assure good crop establishment no stress was allowed during emergence. The irrigation depths applied during both crop seasons and all irrigation treatments are presented in Table A2.

The dates of each crop growth stage as defined in FAO56 [31] and the respective cumulated growing degree days (CGDD, °C) are presented in Table A3. Measurements of the photosynthetically active radiation (PAR) were performed in the treatment FI using a ceptometer (Decagon AccuPar LP 80). Following Farahani et al. [32], these measurements were converted into canopy cover (CC) and fraction of ground cover (f_c) for use with AquaCrop and SIMDualKc respectively. The crop height (h , m) and rooting depths (Z_r , m) were randomly measured and the maximum root depth observed was 1 m. The final above ground biomass and soybean grain yield were obtained from harvesting all experimental plots; samples were oven dried to constant weight at 65±5 °C.

6.3.2. **Modelling**

Two modelling approaches are used: (a) the SIMDualKc [33] soil water balance model that uses the FAO56 dual crop coefficient approach for partitioning crop ET and is combined with the modified Stewart's global water-yield model [17] for yield predictions, and (b) the crop growth and yield model AquaCrop, that partitions ET based upon the canopy cover (CC).

As revised [34,35], the FAO56 dual crop coefficient approach (dual-K_c, [31,36]) accurately models and partitions ET as described in several studies [e.g.,37,38], and when compared with the dual-source Shuttleworth-Wallace model [39]. The SIMDualKc model has been positively tested for actual transpiration using sap-flow measurements [40,41] and for soil evaporation with micro-lysimeters measured E_s [42,43] including for soybean [26]. The SIMDualKc model computes crop evapotranspiration (ET_c) under standard/potential, non-limiting conditions as

$$ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_o \quad (1)$$

where ET_o (mm) is the reference evapotranspiration, K_{cb} (dimensionless) is the potential basal crop coefficient that describes transpiration (T_c), and K_e (dimensionless) is the soil water evaporation coefficient that describes soil evaporation (E_s). The model provides for separately computing potential transpiration T_c = K_{cb} ET_o (mm) and soil evaporation E_s = K_e ET_o (mm). The actual crop ET (ET_{c act}, mm) is computed by the model as a function of the available soil water in the root zone (ASW): when soil water extraction is smaller than the depletion fraction for no stress (p) then ET_{c act} = ET_c, otherwise ET_{c act} < ET_c and decreases with ASW. The ET_{c act} and the T_{c act} are therefore defined as

$$ET_{c act} = (K_s K_{cb} + K_e) ET_o \quad (2)$$

$$T_{c act} = K_s K_{cb} ET_o \quad (3)$$

where K_s (dimensionless) is the water stress coefficient [0 - 1]. K_s is computed through a soil water balance applied to the entire root zone (SWB). Soil evaporation is given as

$$E_s = K_e ET_o \quad (4)$$

with K_e depending on the fraction of ground cover by vegetation (f_c) and the SWC in the top soil layer with depth Z_e of 10 – 15 cm. K_e is computed daily through a SWB of the evaporation layer characterized by the readily and total evaporable water (REW, TEW, mm) and that may be computed from the soil textural and water holding characteristics of the top-layer [31,36]. K_e is adjusted for mulches and for the fraction of soil wetted by irrigation and exposed to radiation.

The SWB of the root zone is performed by computing the soil water depletion $D_{r,i}$ at the end of every day i :

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,act,i} + DP_i \quad (5)$$

from the depletion $D_{r,i-1}$ of the precedent day $i-1$ and the precipitation P , runoff RO , net irrigation depth I , capillary rise CR , deep percolation DP and crop $ET_{c,act}$, all terms in mm and referring to day i . CR was not considered because the water table was deep. RO was computed using the curve number (CN) approach [44]. DP was computed with a parametric equation [45] requiring two parameters, a_D characterizing storage and b_D referring to the velocity of vertical drainage, both estimated from soil physical characteristics [45].

The SIMDualKc model calibration consists of searching the model crop parameters – basal crop coefficients K_{cb} and depletion fractions for no stress p , soil evaporation parameters Z_e , TEW and REW, runoff curve number CN, and DP parameters a_D and b_D – that minimized the deviations between the simulated and observed SWC values. The calibration is performed through an iterative procedure of searching the best parameters values within a reasonable range with SWC errors decreasing until nearly stabilizing as discussed by Pereira et al. [21]. This procedure is first applied to the crop parameters and, after, to the remaining parameters and, finally, to all parameters together. Validation consists of testing the model using the calibrated set of parameters with one or more sets of independent field data collected in the same or different years. However, if validation is performed in a soil with different characteristics, then parameters Z_e , TEW, REW, a_D and b_D have to be adjusted as described by Giménez et al. [46] for maize in Paysandú.

Model calibration was performed using SWC values observed in the FI treatment in 2011-12. The validation used all other datasets of 2011-12 and 2012-13.

As stated above, the SIMDualKc model was combined with a modified version of the water-yield model proposed by Stewart et al. [17] to assess the impacts of water deficits on yields. The version used in the present study assumes a linear variation of the relative yield loss with the relative crop transpiration deficits [19]:

$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = K_y \left(1 - \frac{T_{c \text{ act}}}{T_c} \right) \quad (6)$$

where Y_a and Y_m are the actual and maximum yields (kg ha^{-1}) corresponding respectively to the seasonal $T_{c \text{ act}}$ and T_c (mm), and K_y is the water-yield response factor. The Y_a values consist of dry grain yields observed in all plots and both years. Values for Y_m were obtained from maximum yields observed, further using the Wageningen method [18] and checking results against maximal yields achieved by best farmers. The resulting Y_m are 6.15 and 5.22 t ha^{-1} respectively for 2011-12 and 2012-13. The value $K_y = 1.25$ was adopted from solving Eq. 6 relative to K_y using all experimental data available. When knowing K_y and Y_m , yield predictions were performed by solving Eq. 6 in relation to Y_a for all $T_{c \text{ act}}$ results of SIMDualKc.

The Aquacrop model is a crop growth and yield model used for a variety of field crops, including soybean, mainly aiming at yield prediction. The model is described by Raes et al. [14] and Vanuytrecht et al. [47], and its open source is described by Foster et al. [48], as well as in various papers quoted there. T_c is computed as

$$T_c = CC^* K_{cTr} \times ET_o \quad (7)$$

where CC^* is the crop canopy cover (%) adjusted for micro-advective effects, and K_{cTr} is the maximum standard crop transpiration coefficient (dimensionless), that approaches the $K_{cb \text{ mid}}$ parameter in FAO56 [31]. $T_{c \text{ act}}$ is obtained by adjusting T_c using the water stress coefficient K_s (0 - 1), thus $T_{c \text{ act}} = K_s T_c$. In AquaCrop, however, K_s is more complex than in FAO56 because it describes effects of the soil water stress on various processes and depletion fractions p are inputted to the model but, differently of SIMDualKc, do not require parameterization [14].

Soil evaporation is also obtained from CC^* as

$$E_s = K_r (1 - CC^*) K_e \times ET_o \quad (8)$$

where K_e is the maximum soil evaporation coefficient (non-dimensional) and K_r is the evaporation reduction coefficient (0 - 1), with $K_r < 1$ when insufficient water is available in the top soil to respond to the evaporative demand of the atmosphere [14]. The product $K_r (1 - CC^*) K_e$ corresponds to K_e defined in FAO56 as described above. The canopy cover (CC) is similar to f_c in FAO56 but while SIMDualKc uses observed f_c for adjusting K_e , in AquaCrop the CC observations are used to parameterize a CC^* curve which is performed in three phases and focuses on four parameters that describe the curve, cc_o , CC_x , CGC and CDC [14].

The above ground dry biomass (B , $t\ ha^{-1}$) is estimated by the model using the water transpired by the crop along the season and the normalized biomass water productivity (BWP^* , $g\ m^{-2}$). BWP^* represents B produced per unit of area considering the cumulative transpiration and ET_o [14]. The crop yield (Y , $t\ ha^{-1}$) is computed from B as

$$Y = f_{HI} HI_o B \quad (9)$$

where HI_o is the reference harvest index, describing the harvestable proportion of B , and f_{HI} is an adjustment factor integrating five water stress factors [14].

The model parametrization was initialized using the parameter values proposed by Raes et al. [14]. The parametrizations of the CC curves were first performed using a trial and error procedure. Once these curves were properly parameterized, the trial and error procedure was applied to search the $K_{c\ Tr, x}$ value that better leads to fit SWC observations. In this search, the CN and REW values found for SIMDualKc were used. Growth and yield parameters were obtained using the above-ground biomass observations. The parameters retained after parameterization using FI data of 2011-12 were used for model testing using all data sets.

“Goodness-of-fit” indicators were used to assess the accuracy of model simulations at calibration and validation of SIMDualKc and parameterization and testing of AquaCrop. Indicators, following Legates and McCabe Jr. [49], Moriasi et al. [50] and described by Pereira et al. [21], were computed from the pairs of observed and predicted values, respectively O_i and P_i ($i = 1, 2, \dots, n$) which means are $\bar{O}$ and $\bar{P}$. The regression coefficient b_0 of a regression forced to the origin relating O_i

and P_i was used to verify how similar were the simulated and observed values. The determination coefficient R^2 of the ordinary least squares regression of the same variables was used to assess the dispersion of pairs of O_i and P_i values along the regression line, with large R^2 indicating that a large fraction of the variance of observations was explained by the model. The root mean square error (RMSE), and the normalized root mean square error relative to the mean of observations (NRMSE) were adopted to assess modelling errors. In addition, the Nash and Sutcliffe [51] modelling efficiency (EF) was adopted to express the relative magnitude of the mean square error ($MSE=RMSE^2$) in relation to the variance of the observed data [49].

6.4. RESULTS AND DISCUSSION

6.4.1. Soil water simulation and models calibration and parameterization

Simulations with both models are presented in Fig. 1: Figs. 1a and 1b refer to $DI_{Veg-GFill}$ in 2011-12, when a heavy water deficit was applied from the vegetative growth to grain filling, a sensitive water stress period; Figs. 1c and 1d refer to FI in 2012-13, where water stress was avoided; and Figs. 1e and 1f are relative to rain-fed cropping in 2012-13, where only a limited stress has occurred during pod formation. Water stress for the rain-fed crop is smaller than with $DI_{Veg-GFill}$ because, contrarily to the latter, rainfall was not avoided during any period. Results show that both models behaved well and similarly, which is due to their careful calibration/parameterization.

The “goodness-of-fit” indicators relative to all SWC simulations with SIMDualKc and AquaCrop (Table 1) show a better model performance when SIMDualKc is used. Regression coefficients (b_0) ranged from 0.95 to 1.01 and R^2 varied 0.65 to 0.94 for SIMDualKc applications indicating that the predicted and observed values were statistically similar and a large fraction of the total variance of the observed SWC values was explained by the model.

Wider but acceptable values were obtained for AquaCrop, with b_0 ranging from 0.92 to 1.06 and R^2 varying from 0.61 to 0.92. The estimation errors were small for SIMDualKc ($RMSE < 0.025 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ and $NRMSE < 7.6\%$) and slightly larger for AquaCrop ($RMSE < 0.029 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ and $NRMSE < 9.2\%$).

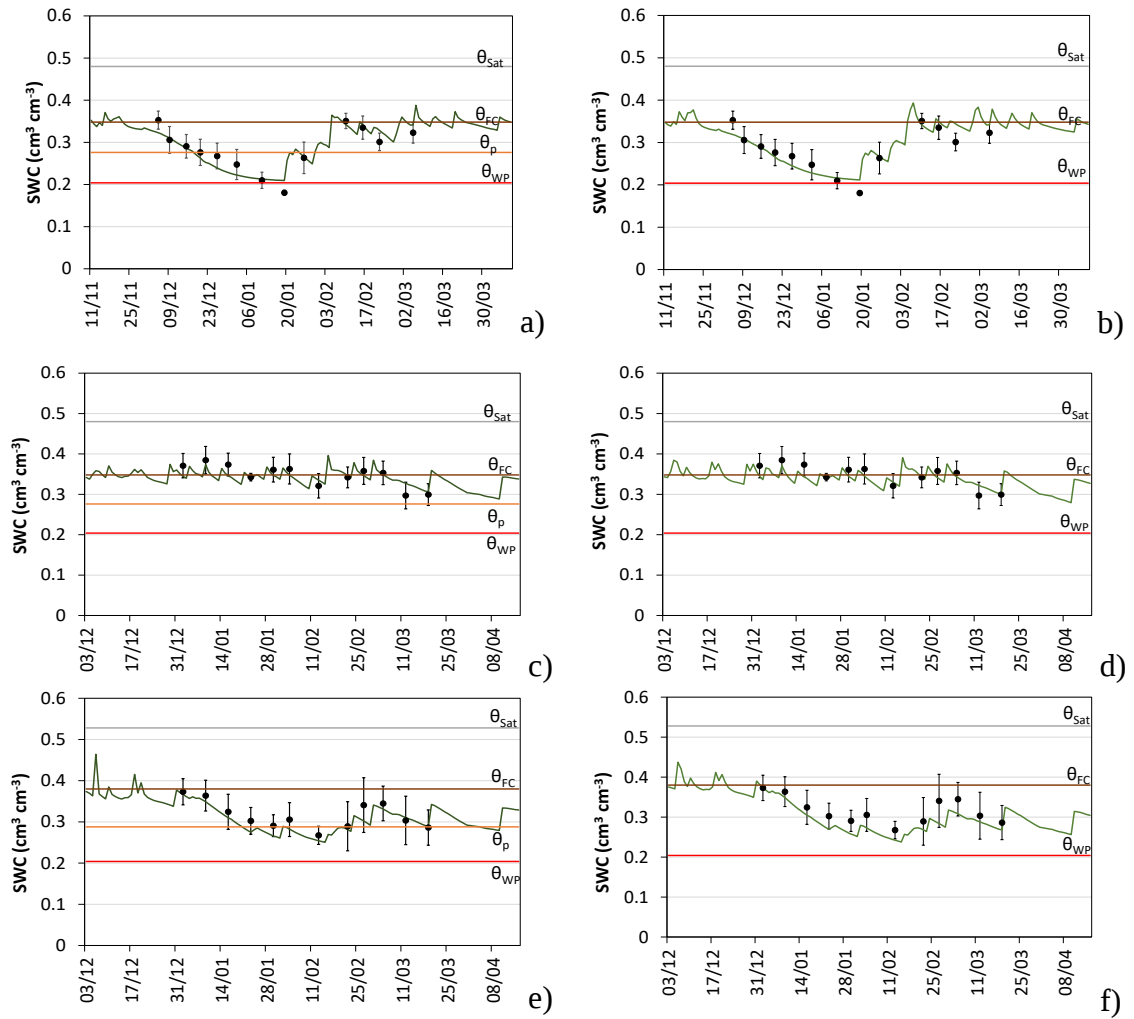


Figure 1. Observed (●) and simulated (—) daily average soil water content (SWC) in the soil root zone using the models SIMDualKc (left) and AquaCrop (right) for: (a, b) $DI_{Veg-GFill}$ in 2011-12; (c, d) FI in 2012-13; and (e, f) rain-fed in 2012-13 (error bars indicate the standard deviation of SWC observations; θ_{Sat} , θ_{FC} , θ_{WP} and θ_p are respectively the SWC at saturation, field capacity, wilting point and at the threshold depletion for no stress).

Model efficiency was high for SIMDualKc, with EF ranging from 0.61 to 0.91, indicating that simulation errors MSE were much smaller than the variance of SWC observations. Differently, EF values obtained for AquaCrop varied in a wider range, 0.16 to 0.93, indicating that MSE varied widely relative to the variance of

observations. Overall, results indicate that despite both models are appropriate for daily simulating SWC, SIMDualKc was performing better.

Table 1. “Goodness-of-fit” indicators relative to the daily simulation of SWC with SIMDualKc and AquaCrop

Model	Crop season	Irrigation strategy	b_0	R^2	RMSE ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	NRMSE (%)	EF
SIMDualKc	2011-12	FI	0.99	0.65	0.019	5.6	0.63
		DI _{GFill}	0.98	0.73	0.025	7.6	0.71
		DI _{Veg}	0.99	0.86	0.019	6.6	0.86
		DI _{Veg-GFill}	0.97	0.84	0.017	5.9	0.79
		Rain-fed	0.98	0.83	0.019	6.5	0.82
	2012-13	FI	0.98	0.74	0.017	4.8	0.61
		DI _{GFill}	0.98	0.94	0.014	4.2	0.91
		DI _{Veg}	0.99	0.79	0.017	5.1	0.69
		DI _{Veg-GFill}	1.01	0.82	0.015	4.8	0.80
		Rain-fed	0.95	0.86	0.019	6.0	0.64
AquaCrop	2011-12	FI	0.99	0.61	0.020	6.1	0.57
		DI _{GFill}	1.03	0.72	0.028	8.5	0.64
		DI _{Veg}	1.00	0.93	0.010	3.4	0.93
		DI _{Veg-GFill}	1.00	0.83	0.021	7.3	0.83
		Rain-fed	0.99	0.88	0.016	5.3	0.88
	2012-13	FI	0.97	0.76	0.018	5.0	0.58
		DI _{GFill}	0.95	0.92	0.021	6.6	0.79
		DI _{Veg}	1.00	0.76	0.023	7.0	0.41
		DI _{Veg-GFill}	1.06	0.87	0.022	7.3	0.54
		Rain-fed	0.92	0.86	0.029	9.2	0.16

b_0 and R^2 are the coefficients of regression and determination, respectively; RMSE is the root mean square error; NRMSE is the normalized root mean square error; and EF is the model efficiency

The SIMDualKc calibrated parameters – K_{cb} , p , TEW, REW, Z_e , CN, a_D and b_D – are presented in Table 2. CN, Z_e , REW, TEW, a_D and b_D are the same as previously obtained by Giménez et al. [46] for the same experimental area because they essentially depend upon the soil characteristics rather than the crop. The K_{cb} and p values resulted equal to those proposed by Allen et al. [31]- $K_{cb \text{ ini}} = 0.15$, $K_{cb \text{ mid}} = 1.10$ and $K_{cb \text{ end}} = 0.33$. Slightly lower $K_{cb \text{ mid}}$ values were obtained by Odhiambo and Irmak [52] and Wei et al. [26]. $K_{cb \text{ ini}}$ and $K_{cb \text{ end}}$ reported by these authors are about the same as for the current study. Calibrated $K_{cb \text{ mid}}$ values are also coherent relative to the single crop coefficients $K_{c \text{ mid}}$ reported by Karam et al. [3], Tabrizi et al. [53] and Payero and Irmak [54]. Thus, results relative to potential K_{cb} and p values confirm those proposed in FAO56 [31].

Relative to AquaCrop, the “goodness-of-fit” of CC curves for FI in both seasons have shown a slight under-estimation trend, with $b_0 = 0.93$, but other goodness-of-fit indicators were generally high, with R^2 of 0.99 and RMSE of 6.8% and 6.4% respectively for 2011-12 and 2012-13 seasons. These values are in the range of other AquaCrop applications to soybean [15,16,55]; thus, one may consider adequate the parameterization of the CC curves in the current study.

The conservative and non-conservative parameters used in AquaCrop are also presented in Table 2. The value for $K_{c\ Tr, x} = 1.10$ equals the $K_{cb\ mid}$ calibrated with SIMDualKc (Table 2). Similar values were reported by Abi Saab et al. [15] and Paredes et al. [16]. The BWP* was set at $14\ g\ m^{-2}$, which equals the one reported by Abi Saab et al. [15] and Khoshravesh et al. [55], while a higher value was reported by Paredes et al. [16]. For no-stress conditions, HI_o observed in both seasons averaged 0.38. That HI_o value equals the one reported by Paredes et al. [16]; slightly smaller values were reported by Andrade [2] and larger values were reported by Abi Saab et al. [15] and Khoshravesh et al. [55]. Differences in BWP* and HI_o values may relate to soybean varieties. Overall, results analyzed above allow concluding that parameters in Table 2 are appropriate for use with soybean in western Uruguay.

6.4.2. **Water balance and water use components**

The actual $ET_{c\ act}$ computed with SIMDualKc and AquaCrop were quite similar (Table 3), which agree with results of SWC simulation discussed above. However, its partition produced different values for $T_{c\ act}$ and E_s , generally a smaller $T_{c\ act}$ and a larger E_s with AquaCrop due to differences in the computational procedures. Comparing respectively Eqs. 3 and 7 and Eqs.4 and 8, it is apparent that differences mainly steam from procedures used to compute the actual K_{cb} and K_e .

In fact, the daily K_{cb} and $K_{cb\ act}$ curves obtained with SIMDualKc and AquaCrop are quite different (Fig. 2), particularly under heavy water stress (Figs. 2a and 2b). Differences largely steam from the form of the potential K_{cb} curve, with SIMDualKc using the typical linear variation of K_{cb} for the four crop growth stages adopted in FAO56 [31], i.e., a K_{cb} curve defined with only three values - $K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ mid}$ and K_{cb}

end – (Figs. 2a, 2c, 2e), while a curvilinear variation of K_{cb} dictated by the parameterized CC curve is adopted in AquaCrop (Figs. 2b, 2d, 2f).

Table 2. SIMDualKc calibrated parameters and AquaCrop conservative and calibrated parameters.

Model	Parameters	Values	
SIMDualKc	Crop	K _{cb ini}	0.15
		K _{cb mid}	1.10
		K _{cb end}	0.35
		p _{ini}	0.50
		p _{dev}	0.50
		p _{mid}	0.50
		p _{end}	0.50
	Soil evaporation	REW (mm)	10
		TEW (mm)	23
		Z _e (m)	0.10
	Deep percolation	a _D	370/360*
		b _D	-0.017
	Runoff	CN	80
AquaCrop	Conservative crop	Base temperature (°C)	5
		Cut-off temperature (°C)	30
		Canopy cover at 90% emergence (cc _o , %)	1.5
		Soil water depletion threshold for canopy expansion (Upper threshold)	0.15
		Soil water depletion threshold for canopy expansion (Lower threshold)	0.65
		Shape factor for water stress coefficient for canopy expansion	3.0
		Soil water depletion threshold for stomatal control	0.50
		Shape factor for water stress coefficient for stomatal control	3.0
		Calibrated crop	Crop coefficient for transpiration (K _{c Tr x})
	Adjusted biomass (water) productivity (BWP*g m ⁻²)		14
	Maximum canopy cover (CC _x , %)		100
	Canopy growth coefficient (CGC, % GDD ⁻¹)		0.744
	Canopy decline coefficient (CDC, % GDD ⁻¹)		0.440

REW and TEW are the readily and total evaporable water; Z_e is the depth of the soil evaporation layer; CN is the curve number; a_D and b_D are the parameters of the deep percolation equation [46]. * different values were obtained due to the spatial heterogeneity of the soil among experimental plots

Without a very heavy stress the variation of K_{cb} are somewhat similar for both models (Figs. 2c and 2d, and Fig. 2e and 2f) but when a heavy water stress occurs, e.g., $DI_{Veg-GFill}$ in 2011-12 (Fig. 2b), the

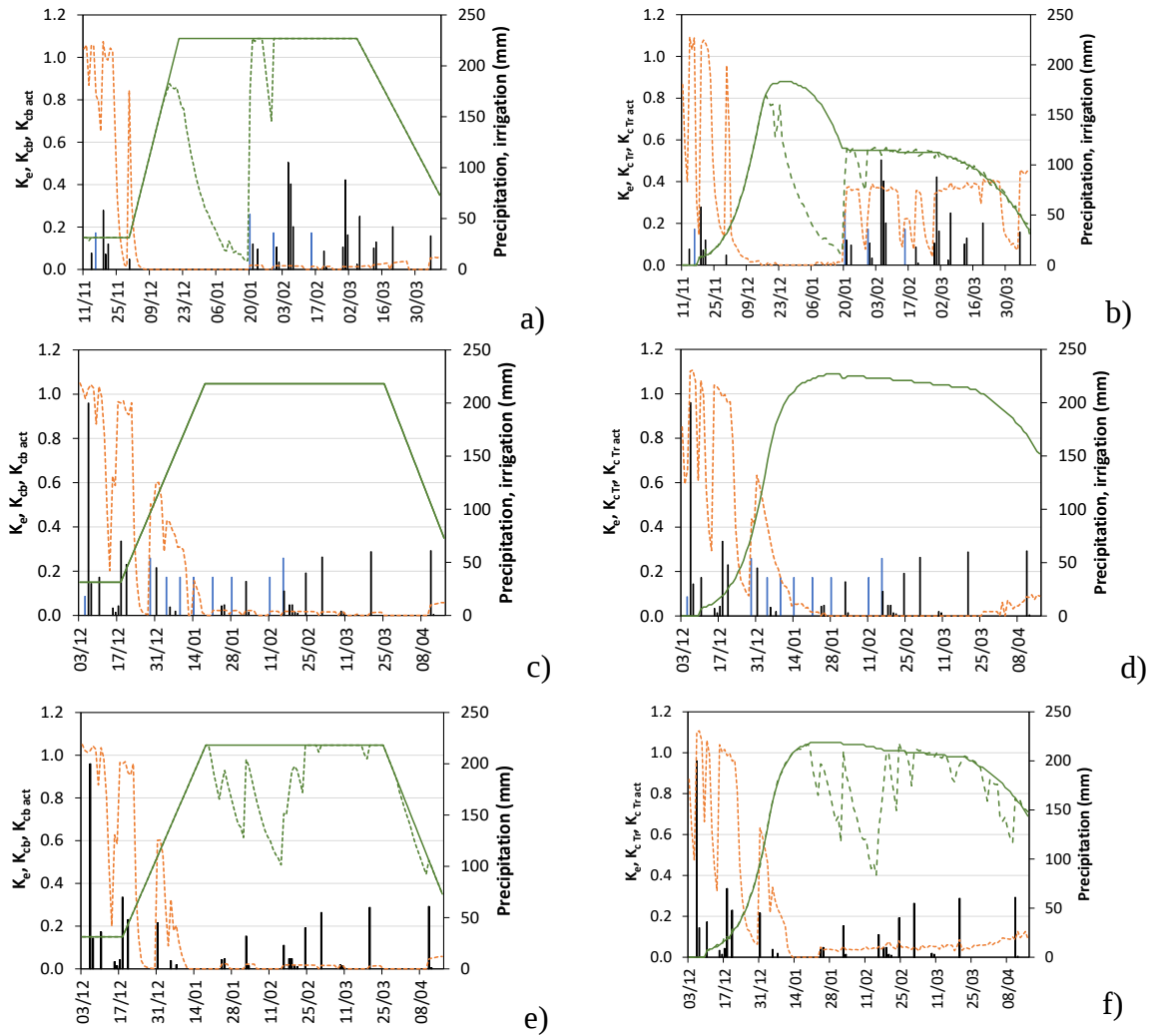


Figure 2. Selected examples of the daily variation of the standard and actual basal crop coefficients (K_{cb} — and $K_{cb\ act}$ — —) and of the evaporation coefficient (K_e — —) computed with SIMDualKc (on left) and AquaCrop (on right) relative to the irrigation treatments $DI_{Veg-GFill}$ in 2011-12 (a, b), FI in 2012-13 (c, d), and rain-fed in 2012-13 (e, f). Precipitation (■) and irrigation (■) are also depicted.

K_{cb} curve of AquaCrop is far from representing the potential K_{cb} defined in FAO56 [31,35] because this model does not use $K_{cb\ mid}$ but just the maximum $K_{c\ Tr, x}$. When water stress occurs but not highly affects crop development, case of the rain-fed treatment, both Figs. 2e and 2f show a similar behavior of $K_{cb\ act}$ until the end of February, but differences in the $K_{cb\ act}$ curve afterwards, likely due to the model approach used to compute the stress coefficient K_s which includes various stresses in addition to soil water deficits.

The daily variation of the K_e in all examples of Fig. 2 show a similar behavior during the initial and early vegetative crop stages, however with a tendency to estimate a larger K_e with AquaCrop. Differently, K_e tends to be larger afterwards when water stress occurs particularly during mid-season. Differences in K_e computed by both models increase when water deficits are larger (Figs. 2a and 2b). Differences between models are due to the fact that K_e in SIMDualKc varies with the observed f_c and the daily computed depletion of the soil evaporation layer [33] while K_e in AquaCrop depends upon the fitted CC curve. Therefore, K_e tends to be higher with AquaCrop when water deficits occur. Under no stress conditions differences are negligible (Fig. 2c and 2d) as observed by Paredes et al. [16].

Analysing the ET estimates and partition into E_s and $T_{c \text{ act}}$ during the initial period (Table 3) it was observed that SIMDualKc simulated E_s representing 81 to 85% of $ET_{c \text{ act}}$ while AquaCrop simulated a larger E_s corresponding to 92 - 97% of $ET_{c \text{ act}}$, thus resulting a quite small $T_{c \text{ act}}$.

Throughout the crop development stage, due to the progressive decrease of the soil surface fraction exposed to solar radiation, E_s progressively decreased as shown in Fig. 2. During this period, $E_s/ET_{c \text{ act}}$ falls, in average, to 29% and 33% when computed with respectively SIMDualKc and AquaCrop. During the mid-season the soil is nearly fully shadowed by the crop and the energy available for evaporation drops to minimum values. Thus, $E_s/ET_{c \text{ act}}$ falls to 2% and 6% in average when computed with respectively SIMDualKc and AquaCrop (Table 3). However, AquaCrop estimated $E_s/ET_{c \text{ act}}$ in a very wide range, from 1% to 26% likely due to the heavy dependency of E_s from CC (Eq. 7), i.e., whenever the model simulated high impacts of water stress and reduced CC as for $DI_{\text{veg-GFill}}$ and rain-fed during 2011-12 it resulted higher $E_s/ET_{c \text{ act}}$ values. Thus, resulting differences between models relative to $T_{c \text{ act}}$ amounted up to 40% when water stress occurs, with higher $T_{c \text{ act}}$ for SIMDualKc (Table 3). During the late season, despite lower coverage of the soil due to leaf senescence, because watering events were small and infrequent, $E_s/ET_{c \text{ act}}$ increased slightly with SIMDualKc but to an average of 15% when using AquaCrop. Farahani et al. [32] reported high $E_s/ET_{c \text{ act}}$ ratios with AquaCrop under water stress. Consequently, it could be concluded that AquaCrop tends to

underestimate $T_{c \text{ act}}$ throughout the crop season, mainly under water deficit conditions.

Table 3. Simulated soil evaporation (E_s), actual transpiration ($T_{c \text{ act}}$) and the ratio $E_s/ET_{c \text{ act}}$ for the various crop growth stages and all different irrigation treatments of soybean when using the SIMDualKc (SIM) and AquaCrop (Aqua) models in the 2011-12 and 2012-13.

Year/strategy		Crop stage									
		Initial		Crop development		Mid-season		Late season		Full season	
		SIM	Aqua	SIM	Aqua	SIM	Aqua	SIM	Aqua	SIM	Aqua
2011-12											
FI	E_s (mm)	77	68	28	26	4	9	3	11	112	114
	$T_{c \text{ act}}$ (mm)	16	6	71	64	436	419	83	85	606	574
	$E_s/ET_{c \text{ act}}$ (%)	83	92	28	29	1	2	3	11	16	17
DI _{GFill}	E_s (mm)	75	70	22	27	3	9	2	11	102	117
	$T_{c \text{ act}}$ (mm)	16	6	71	64	407	416	83	85	577	571
	$E_s/ET_{c \text{ act}}$ (%)	82	92	24	30	1	2	2	11	15	17
DI _{Veg}	E_s (mm)	77	68	3	8	2	59	3	38	85	173
	$T_{c \text{ act}}$ (mm)	16	6	68	58	283	167	83	44	450	275
	$E_s/ET_{c \text{ act}}$ (%)	83	92	4	12	1	26	3	46	16	39
DI _{Veg-GFill}	E_s (mm)	75	70	3	8	2	34	2	25	82	137
	$T_{c \text{ act}}$ (mm)	16	6	68	61	262	235	83	68	429	370
	$E_s/ET_{c \text{ act}}$ (%)	82	92	4	12	1	13	2	27	16	27
Rain-fed	E_s (mm)	70	70	3	8	2	36	3	22	78	136
	$T_{c \text{ act}}$ (mm)	16	6	68	61	290	250	83	67	457	384
	$E_s/ET_{c \text{ act}}$ (%)	81	92	4	12	1	13	3	25	15	26
2012-13											
FI	E_s (mm)	64	62	51	49	3	1	1	3	119	115
	$T_{c \text{ act}}$ (mm)	11	2	95	96	291	295	50	61	447	454
	$E_s/ET_{c \text{ act}}$ (%)	85	97	35	34	1	0	2	5	21	20
DI _{GFill}	E_s (mm)	64	62	47	49	3	1	1	3	115	115
	$T_{c \text{ act}}$ (mm)	12	2	95	95	277	270	50	57	434	424
	$E_s/ET_{c \text{ act}}$ (%)	84	97	33	34	1	0	2	5	21	21
DI _{Veg}	E_s (mm)	63	63	39	48	2	8	1	5	105	124
	$T_{c \text{ act}}$ (mm)	12	2	95	95	250	248	50	58	407	403
	$E_s/ET_{c \text{ act}}$ (%)	84	97	29	34	1	3	2	8	21	24
DI _{Veg-GFill}	E_s (mm)	62	62	43	50	3	1	1	3	109	116
	$T_{c \text{ act}}$ (mm)	12	2	95	95	280	293	50	61	437	451
	$E_s/ET_{c \text{ act}}$ (%)	84	97	31	34	1	0	2	5	20	20
Rain-fed	E_s (mm)	64	62	34	43	2	11	1	5	101	121
	$T_{c \text{ act}}$ (mm)	12	2	95	95	245	233	48	53	400	383
	$E_s/ET_{c \text{ act}}$ (%)	84	97	26	31	1	5	2	9	20	24

Differences relative to the non-consumptive use terms, runoff and deep percolation, are notable, particularly for the 2012-13 season (Table 4). RO and DP, which sum equals the difference between the water input and $ET_{c \text{ act}}$, differ between models, with

differences steaming from computational approaches as also observed by Pereira et al. [21]. The CN value used for RO computations was the same with both models but related computational processes are different [14,33], thus RO values result also different.

DP values computed with SIMDualKc were generally higher, up to 171 mm, than those estimated with AquaCrop (Table 4) due to differences in the computation of DP: SIMDualKc uses a parametric function (Liu et al. 2006) whose parameters a_D and b_D are calibrated, as per this application; differently, in AquaCrop DP is estimated using a quasi-deterministic redistribution and drainage module based on the hydraulic characteristics of the soil [14] but does not use calibrated parameters. Possible deficiencies in that DP module were referred by Pereira et al. [21] and Iqbal et al. [56], as well as Farahani et al. [32] who compared computed with field observed DP. As analyzed by several authors [e.g., 57], AquaCrop was not yet tested for heavy water stress conditions. Results herein relative to the soil water balance components and, mainly for the partition of ET_{cact} support the need for improving that model.

6.4.3. **Biomass and yield predictions**

The available data on water use and transpiration, biomass and yield covering four seasons, 2009-10 to 2012-13, were used to test the biomass and yield predictions by AquaCrop and the Stewart's model combined with SIMDualKc. Yields of all treatments were significantly different as per an application of ANOVA (data not shown).

Results for biomass estimations compared with observations using both models have shown a reasonable accuracy of the SIMDualKc-Stewart combined approach, with no tendency for under- or over-estimation ($b_0=0.97$), RMSE of 1.86 t ha^{-1} , NRMSE of 17% and $EF = 0.48$. Differently, AquaCrop showed a tendency for slightly over-estimating biomass ($b_0=1.06$), larger prediction errors (RMSE = 2.81 t ha^{-1} and NRMSE = 26%) and a negative EF of -0.19. Negative EF values indicate that the mean square error is larger than the variance of observations, thus there is no advantage in using the model.

Yield predictions also more often show better results with the SIMDualKc-Stewart combined approach (Table 5), which have shown a tendency for slightly over-predicting yields ($b_0 = 1.04$), with relative deviations between predicted and simulated yields ranging from 0% to 67% (Table 5). AquaCrop results have not shown tendency for under- or over-estimation ($b_0 = 0.99$) but deviations vary in a wider range of 1% to 103%. Deviations between observed and simulated yields using the SIMDualKc-Stewart approach are in the range of those reported by Ma et al. [6] using the CROPGRO-Soybean and the hybrid RZWQM-CROPGRO-Soybean model, and by Banterng et al. [58] when using the CROPGRO-Soybean model.

Table 4. Water balance components computed with the SIMDualKc and AquaCrop models for all irrigation treatments and both crop seasons of 2011-12 and 2012-13

Treatment Model		P (mm)	I (mm)	Δ SWC (mm)	DP (mm)	RO (mm)	$ET_{c\ act}$ (mm)	$T_{c\ act}$ (mm)	E_s (mm)	$E_s/ET_{c\ act}$ (%)
2011-12										
FI	SIMDualKc	821	354	16	266	207	718	606	112	16
	AquaCrop	821	354	23	245	266	688	574	114	17
DI_{GFill}	SIMDualKc	676	288	37	190	132	679	577	102	15
	AquaCrop	676	288	-8	109	159	688	571	117	17
DI_{Veg}	SIMDualKc	773	162	15	211	204	535	450	85	16
	AquaCrop	773	162	19	248	259	448	275	173	39
$DI_{Veg-GFill}$	SIMDualKc	628	90	22	100	129	511	429	82	16
	AquaCrop	628	90	6	80	138	507	370	137	27
Rain-fed	SIMDualKc	821	0	17	98	205	535	457	78	15
	AquaCrop	821	0	5	89	217	520	384	136	26
2012-13										
FI	SIMDualKc	786	342	10	408	164	566	447	119	21
	AquaCrop	786	342	20	306	273	569	454	115	20
DI_{GFill}	SIMDualKc	666	306	39	304	158	549	434	115	21
	AquaCrop	666	306	56	216	274	539	424	115	21
DI_{Veg}	SIMDualKc	746	216	45	330	164	512	407	105	21
	AquaCrop	746	216	-2	159	274	527	403	124	24
$DI_{Veg-GFill}$	SIMDualKc	668	306	39	318	149	546	437	109	20
	AquaCrop	668	306	30	180	257	567	451	116	20
Rain-fed	SIMDualKc	786	0	61	183	164	501	400	101	20
	AquaCrop	786	0	75	139	219	504	383	121	24

P is precipitation, I is net irrigation depths, Δ SWC is variation in stored soil water, DP is deep percolation, RO is runoff, $ET_{c\ act}$ is actual crop evapotranspiration, T_{act} is the actual crop transpiration, E_s is the soil evaporation

The “goodness-of-fit” indicators relative to all yield predictions with AquaCrop were poor, with RMSE=1.01 t ha⁻¹, NRMSE=22.8% and EF= -0.41. The

negative EF indicates that the MSE is larger than the variance of observations, thus modelling predictions are poor and there is no effective advantage in using this model.

Nevertheless, results in the current study relative to AquaCrop applications are in the range of those reported by Mercau et al. [7] using CROPGRO-Soybean, and Cera et al. [12] using SoySim. However, better results using AquaCrop for soybean were reported by Abi Saab et al. [15], Paredes et al. [16] and Battisti et al. [27] which studies did only consider non-heavy water stress. The above referred results are likely due to the previously discussed poor estimation of actual transpiration when water stress occurs. Katerji et al. [57] and Pereira et al. [21] also reported that AquaCrop biomass and yield predictions were poor under heavy water stress because they were hampered by poor estimations of $T_{c\text{ act}}$. Contrasting, good predictions were obtained with AquaCrop for vining pea [59], which was cultivated without water stress, thus confirming that the use of AquaCrop predictions is only recommended when heavy water stress is not considered.

Table 5. Deviations between predicted and observed soybean final yield (kg ha⁻¹) when using the SIMDualKc-Stewart's approach and the AquaCrop model for all observed data

Year	Irrig. strategy	Observed (kg ha ⁻¹)	SIMDualKc-Stewart			AquaCrop		
			Predicted	Deviation		Predicted	Deviation	
			(kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	(%)	(kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	(%)
2009-10	FI	4225 (±215)	4281	-56	-1	5179	-954	-23
	DI _{GFill}	2107 (±748)	3490	-1383	-66	4270	-2163	-103
	Rain-fed	4209 (±91)	4278	-68	-2	5182	-973	-23
2010-11	FI	6293 (±209)	6038	255	4	5089	1204	19
	DI _{Veg}	4856 (±1324)	4830	26	1	4407	449	9
	DI _{Veg-GFill}	4592 (±584)	4394	199	4	3626	966	21
	Rain-fed	4377 (±502)	3804	573	13	3684	693	16
2011-12	FI	5368 (±133)	5456	-88	-2	5425	-57	-1
	DI _{GFill}	4071 (±294)	5114	-1043	-26	5367	-1296	-32
	DI _{Veg}	4597 (±178)	3620	977	21	2725	1872	41
	DI _{Veg-GFill}	3491 (±228)	3370	121	3	3662	-171	-5
	Rain-fed	4493 (±105)	3705	788	18	3764	729	16
2012-13	FI	5402 (±591)	5446	-44	-1	5287	115	2
	DI _{GFill}	4605 (±556)	5227	-622	-14	4930	-325	-7
	DI _{Veg}	4045 (±66)	4797	-752	-19	4768	-723	-18
	DI _{Veg-GFill}	4069 (±87)	5276	-1206	-30	5269	-1200	-29
	Rain-fed	4721 (±495)	4683	38	1	4547	174	4

* dried at 65±5°C; the standard deviation is presented between brackets

The “goodness-of-fit” indicators relative to yield predictions with the SIMDualKc-Stewart combined approach were RMSE=0.65 t ha⁻¹, NRMSE=14.5% and EF = 0.43, which are much better than indicators relative to AquaCrop predictions. These RMSE and NRMSE values are in the range of those reported for other model applications, e.g., with the CROPGRO-Soybean model [8]. However, much lower NRMSE were reported when using DSSAT CSM CROPGRO-Soybean [5] and with the hybrid RZWQM-CROPGRO model for soybean [6]. Lower RMSE values were also reported by Setiyono et al. [9] when using the SoySim model in a comparative study using the models CROPGRO-Soybean, Sinclair-Soybean and WOFOST. Results for these models [9] resulted in a much higher RMSE than the one obtained with the combined SIMDualKc-Stewart approach. Therefore, the latter revealed adequate to predict yields aimed at assessing impacts of alternative irrigation scheduling strategies including when a heavy stress is considered.

6.5. CONCLUSIONS

Experimental results relative to various irrigation scheduling treatments imposing deficit irrigation at different crop stages allowed to confirm that the crop growth stage more sensitive to water stress was that relative to flowering-grain filling but highest impacts of water stress were observed when deficits were imposed from vegetative to grain filling period.

Both SIMDualKc and AquaCrop models were successfully calibrated and validated for soybean using SWC data relative to all treatments and two soybean seasons. The accuracy for simulating the SWC dynamics along the crop seasons was better for SIMDualKc, with AquaCrop performing less good, mainly for the treatments with heavy water stress. The water balance terms resulting from the application of both models revealed quite different, mainly due to different procedures for daily computing the actual basal crop coefficient and the evaporation coefficient, thus $T_{c \text{ act}}$ and E_s . This resulted from the fact that computations of potential and actual K_{cb} in SIMDualKc follows the well-established FAO56 dual- K_c methodology while maximum and actual K_{cb} values in AquaCrop depend enormously from the fitted CC curve which only works well for non-stressed crops.

Relative to E_s , there are also large computational differences, also due to the strong dependency of K_e on the fitted CC curve in AquaCrop, while K_e in SIMDualKc is obtained after calibration of the parameters characterizing the evaporative top soil layer and considering the observed f_c fraction.

Differences between models are quite evident in terms of non-consumptive water use, RO and DP. Differences in RO, both computed with the same CN, resulted from differences in algorithms calculations. Relative to DP, the computation modules are very different: in AquaCrop a quasi-deterministic module is used but without calibration; contrasting, a parametric function is used in SIMDualKc but parameters are calibrated. Model differences were detected because simulations under water stress conditions evidenced limitations for AquaCrop. It could be concluded that the calibrated parameters of both SIMDualKc and AquaCrop may be further used for soybean in the region and that SIMDualKc performed more accurately in computing the soil water balance, mainly in estimating $T_{c \text{ act}}$, thus showing to be more appropriate to support farmers advising on supplemental irrigation scheduling.

Both the AquaCrop model and the SIMDualKc-Stewart's combined approach may be used for soybean biomass and yield predictions. However, AquaCrop responded poorly when heavy water stress was imposed, which relates with the above referred poor estimation of $T_{c \text{ act}}$ under those conditions. Thus, whenever the model fitting of CC is less good the model poorly estimates $T_{c \text{ act}}$ and, hence, biomass and yield are under-estimated. Results herein well identified main weaknesses of AquaCrop, thus the need for its further improvement for use with high water deficits. Contrarily, yield predictions with the SIMDualKc-Stewart's approach resulted good because $T_{c \text{ act}}$ was predicted accurately and the empirical yield response factor K_y was calibrated. Thus, that simple approach can be further explored for supporting supplemental irrigation management of soybean in Uruguay.

Based on the current study, the next step is to design supplemental irrigation strategies to cope with climate variability in line with previous studies [13, 60], and considering water productivity and economic farmers' returns. Further research shall also assess the usability of weather forecasts for supporting real time irrigation scheduling.

6.6. REFERENCES

1. Frank, F.C.; Viglizzo, E.F. Water use in rain-fed farming at different scales in the Pampas of Argentina. *Agr. Syst.* **2012**, *109*, 35–42.
2. Andrade, F.H. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crop Res.* **1995**, *41*, 1-12
3. Karam, F.; Masaad, R.; Sfeir, T.; Mounzer, O.; Roupahel, Y. Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. *Agr. Water Manage.* **2005**, *75*, 226–244
4. Payero, J.O.; Melvin, S.R.; Irmak, S. Response of soybean to deficit irrigation in the semi-arid environment of West-Central Nebraska. *T. ASAE* **2005**, *48*(6), 2189–2203
5. Jones, J.W.; Hoogenboom, G.; Porter, C.H.; Boote, K.J.; Batchelor, W.D.; Hunt, L.A.; Wilkens, P.W.; Singh, U.; Gijsman, A.J., Ritchie, J.T. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.* **2003**, *18*, 235-265
6. Ma, L.; Hoogenboom, G.; Ahuja, L.R.; Nielsen, D.C.; Ascough II, J.C. Development and Evaluation of the RZWQM-CROPGRO Hybrid Model for Soybean Production. *Agron. J.* **2005**, *97*, 1172–1182.
7. Mercau, J.L.; Dardanelli, J.L.; Collino, D.J.; Andriani, J.M.; Irigoyen, A.; Satorre, E.H. Predicting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. *Field Crop Res.* **2007**, *100*, 200–209
8. Liu, S.; Yang, J.Y.; Zhang, X.Y.; Drury, C.F.; Reynolds, W.D.; Hoogenboom, G. Modelling crop yield, soil water content and soil temperature for a soybean–maize rotation under conventional and conservation tillage systems in Northeast China. *Agr. Water Manage.* **2013**, *123*, 32– 44
9. Setiyono, T.D.; Cassman, K.G.; Specht, J.E.; Dobermann, A.; Weiss, A.; Yang, H.; Conley, S.P.; Robinson, A.P.; Pedersen, P.; De Bruin, J.L. Simulation of soybean growth and yield in near-optimal growth conditions. *Field Crop. Res.* **2010**, *119*, 161–174
10. Sinclair, T.R. Water and nitrogen limitation in soybean grain production. I. Model development. *Field Crop Res.* **1986**, *15*, 125–141

11. Boogard, H.L.; van Diepen, C.A.; Rötter, R.P.; Cabrera, J.M.C.A.; van Laar, H.H. *User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5*. Technical Document 52. DLO Winand Staring Centre, **1998**, Wageningen, The Netherlands
12. Cera, J.C.; Streck, N.A.; Yang, H.; Zanon, A.J.; de Paula, G.M.; Lago, I. Extending the evaluation of the SoySim model to soybean cultivars with high maturation groups. *Field Crop Res.* **2017**, 201, 162–174
13. Gerdes, G.; Allison, B.E.; Pereira, L.S.; The soybean model SOYGRO: field calibration and evaluation of irrigation schedules. In: L.S. Pereira., B.J. van den Broek, P. Kabat and R.G. Allen (eds.) *Crop-Water-Simulation Models in Practice*. Wageningen Pers, Wageningen, **1995**, pp. 161-173.
14. Raes, D.; Steduto, P.; Hsiao, T.C.; Fereres, E. *Crop Water Productivity. Calculation Procedures and Calibration Guidance. AquaCrop version 4.0.*, **2012**, FAO, Land Water Dev Div. Rome.
15. Abi Saab, M.T.; Albrizio, R.; Nangia, V.; Karam, F.; Roupheal, Y. Developing scenarios to assess sunflower and soybean yield under different sowing dates and water regimes in the Bekaa valley (Lebanon): Simulations with AquaCrop. *Int. J. Plant Prod.* **2014**, 8(4), 457-482
16. Paredes, P.; Wei, Z.; Liu, Y.; Xu, D.; Xin, Y.; Zhang, B.; Pereira, L.S. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water, soil evaporation, biomass and yield of soybeans in north china plain. *Agr. Water Manage.* **2015**, 152, 57–71.
17. Stewart, J.I.; Hagan, R.M.; Pruitt, W.O.; Danielson, R.E.; Franklin, W.T.; Hanks, R.J.; Riley, J.P.; Jackson, E.B. *Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil*. Paper 67. Utah Water Research Laboratory, USA, **1977**, 191 p
18. Doorenbos, J.; Kassam, A.H. *Yield Response to Water*. Irrig. Drain. Paper 33, FAO, Rome, 1979, 193 p.
19. Paredes, P.; Rodrigues, G.C.; Alves, I.; Pereira, L.S. Partitioning evapotranspiration, yield prediction and economic returns of maize under

- various irrigation management strategies. *Agr. Water Manage.* **2014**, 135, 27–39.
20. Paredes, P.; Pereira, L.S.; Rodrigues, G.C.; Botelho, N.; Torres, M.O. Using the FAO dual crop coefficient approach to model water use and productivity of processing pea (*Pisum sativum* L.) as influenced by irrigation strategies. *Agr. Water Manage.* **2017**
 21. Pereira, L.S.; Paredes, P.; Rodrigues, G.C.; Neves, M. Modeling barley water use and evapotranspiration partitioning in two contrasting rainfall years. Assessing SIMDualKc and AquaCrop models. *Agr. Water Manage.* **2015**, 159:239-254.
 22. Lorite, I.J.; García-Vila, M.; Carmona, M.A.; Santos, C.; Soriano, M.A. Assessment of the irrigation advisory services' recommendations and farmers' irrigation management: A case study in Southern Spain. *Water Resour Manage.* **2012**, 26, 2397–2419
 23. Woli, P.; Jones, J.W.; Ingram, K.T.; Hoogenboom, G. Predicting crop yields with the Agricultural Reference Index for Drought. *J. Agron. Crop Sci.* **2014**, 200, 163–171.
 24. Kiymaz, S.; Ertek, A. Water use and yield of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under drip irrigation at different water regimes. *Agr. Water Manage.* **2015**, 158, 225–234.
 25. González Perea, R.; Camacho Poyato, E.; Montesinos, P.; Rodríguez Díaz, J.A. Optimization of irrigation scheduling using soil water balance and genetic algorithms. *Water Resour Manage.* **2016**, 30, 2815–2830
 26. Wei, Z.; Paredes, P.; Liu, Y.; Chi, WW; Pereira, LS. Modelling transpiration, soil evaporation and yield prediction of soybean in North China Plain. *Agr. Water Manage.* **2015**, 147, 43–53.
 27. Battisti, R.; Sentelhas, P.C.; Boote, K.J. Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their ensemble in southern Brazil. *Field Crop Res.* **2017**, 200, 28–37.
 28. Barreiro, M.; Tippmann, A. Atlantic modulation of El Niño influence on summertime rainfall over southeastern South America. *Geophys. Res. Lett.* **2008**, 35, L16704

29. Kayano, M.T.; Andreoli, R.V. Relations of South American summer rainfall interannual variations with the Pacific Decadal Oscillation. *Int. J. Climatol.* **2007**, *27*, 531–540
30. Kottek, M.; Grieser, J.; Beck, C.; Rudolf, B.; Rubel, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.* **2006**, *15*, 259-263.
31. Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. *Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Irrig. Drain. Paper 56. FAO, Rome, 1998, 300 p.
32. Farahani, H.J.; Izzi, G.; Oweis, T.Y. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agron. J.* **2009**, *101*, 469-476
33. Rosa, R.D.; Paredes, P.; Rodrigues, G.C.; Alves, I.; Fernando, R.M.; Pereira, L.S.; Allen, R.G. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy. *Agr. Water Manage.* **2012**, *103*, 8-24.
34. Kool, D.; Agam, N.; Lazarovitch, N.; Heitman, J.L.; Sauer, T.J., Ben-Gal, A. A review of approaches for evapotranspiration partitioning. *Agr. Forest Meteorol.* **2014**, *184*, 56–70.
35. Pereira, L.S., Allen, R.G., Smith, M., Raes D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agr. Water Manage.* **2015**, *147*, 4-20
36. Allen, R.G., Pereira, L.S., Smith, M., Raes, D, Wright, J.L. FAO-56 Dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *J. Irrig. Drain. Eng.* **2005**, *131*, 2-13.
37. Cammalleri, C, Rallo, G, Agnese, C, Ciralo, G, Minacapilli, M, Provenzano, G. Combined use of eddy covariance and sap flow techniques for partition of ET fluxes and water stress assessment in an irrigated olive orchard. *Agr. Water Manage.* **2013**, *120*, 89–97
38. Ding, R, Kang, S, Zhang, Y, Hao, X, Tong, L, Du, T. Partitioning evapotranspiration into soil evaporation and transpiration using a modified dual crop coefficient model in irrigated maize field with ground-mulching. *Agr. Water Manage.* **2013**, *127*, 85– 96.

39. Zhao, P, Li, S, Li, F, Du, T, Tong, L, Kang, S. Comparison of dual crop coefficient method and Shuttleworth–Wallace model in evapotranspiration partitioning in a vineyard of northwest China. *Agr. Water Manage.* **2015**, 160:41–56.
40. Paço, TA, Pôças, I, Cunha, M, Silvestre, JC, Santos, FL, Paredes, P, Pereira, LS. Evapotranspiration and crop coefficients for a super intensive olive orchard. An application of SIMDualKc and METRIC models using ground and satellite observations. *J. Hydrol.* **2014**, 519, 2067–2080.
41. Qiu, R, Du, T, Kang, S, Chen, R, Wu, L. Assessing the SIMDualKc model for estimating evapotranspiration of hot pepper grown in a solar greenhouse in Northwest China. *Agr. Syst.* **2015**, 138, 1–9.
42. Zhao, NN, Liu, Y, Cai, JB, Rosa, RD, Paredes, P, Pereira, LS. Dual crop coefficient modelling applied to the winter wheat - summer maize crop sequence in North China Plain: basal crop coefficients and soil evaporation component. *Agr. Water Manage.* **2013**, 117, 93–105.
43. Gao, Y, Yang, L, Shen, X, Li, X, Sun, J, Duan, A, Wu, L. Winter wheat with subsurface drip irrigation (SDI): Crop coefficients, water-use estimates, and effects of SDI on grain yield and water use efficiency. *Agr. Water Manage.* **2014**, 146, 1–10.
44. Allen, R.G.; Wright, J.L.; Pruitt, W.O.; Pereira, L.S.; Jensen, M.E. Water requirements. In: *Design and Operation of Farm Irrigation Systems*, 2nd Edition; Hoffman, G.J.; Evans, R.G.; Jensen, M.E.; Martin, D.L.; Elliot, R.L. (eds.), ASABE, St. Joseph, MI, **2007**. pp. 208-288.
45. Liu, Y, Pereira, LS, Fernando, RM. Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation. *Agr. Water Manage.* **2006**, 84, 27-40.
46. Giménez, L, García Petillo, M, Paredes, P, Pereira, LS. Predicting maize transpiration, water use and productivity for developing improved supplemental irrigation schedules in western Uruguay to cope with climate variability. *Water* **2016**, 8, 309

47. Vanuytrecht, E, Raes, D, Steduto, P, Hsiao, TC, Fereres, E, Heng, LK, Garcia Vila, M, Moreno, PM. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environ. Modell. Softw.* **2014**, 62, 351–360
48. Foster, T, Brozović, N, Butler, AP, Neale, CMU, Raes, D, Steduto, P, Fereres, E, Hsiao, T. AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model. *Agr. Water Manage.* **2017**, 181, 18–22
49. Legates, D, McCabe Jr., G. Evaluating the use of goodness of fit measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resour. Res.* **1999**, 35, 233-241
50. Moriasi, DN, Arnold, JG, Van Liew, MW, Bingner, RL, Harmel, RD, Veith, TL. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *T. ASABE*, **2007**, 50, 885-900
51. Nash, JE, Sutcliffe, JV. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *J. Hydrol.* **1970**, 10(3), 282-290
52. Odhiambo, LO, Irmak, S. Evaluation of the impact of surface residue cover on single and dual crop coefficient for estimating soybean actual evapotranspiration. *Agr. Water Manage.* **2012**, 104, 221–234.
53. Tabrizi, MS, Parsinejad, M, Babazadeh, H. Efficacy of partial root drying technique for optimizing soybean crop production in semi-arid regions. *Irrig. Drain.* **2012**, 61, 80–88
54. Payero, JO, Irmak, S. Daily energy fluxes, evapotranspiration and crop coefficient of soybean. *Agr. Water Manage.* **2013**, 129, 31–43.
55. Khoshravesh, M, Mostafazadeh-Fard, B, Heidarpour, M, Kiani, AR. AquaCrop model simulation under different irrigation water and nitrogen strategies. *Water Sci. Technol.* **2013**, 67(1), 232-238.
56. Iqbal, MA, Shen, Y, Stricevic, R, Pei, H, Sun, H, Amiri, E, Penas, A, del Rio, S. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agr. Water Manage.* **2014**, 135, 61–72
57. Katerji, N, Campi, P, Mastrorilli, M. Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under

- contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. *Agr. Water Manage.* **2013**, 130, 14-26.
58. Banterng, P, Hoogenboom, G, Patanothai, A, Singh, P, Wani, SP, Pathak, P, Tongpoonpol, S, Atichart, S, Srihaban, P, Buranaviriyakul, S, Jintrawet, A, Nguyen, TC. Application of the Cropping System Model (CSM)-CROPGRO Soybean for determining optimum management strategies for soybean in tropical environments. *J. Agron. Crop Sci.* **2010**, 196, 231–242
59. Paredes, P.; Torres, M.O. Parameterization of AquaCrop model for vining pea biomass and yield predictions and assessing impacts of irrigation strategies considering various sowing dates. *Irrig Sci* **2017**, 35, 27–41
60. Pereira, LS, Oweis, T, Zairi, A, Irrigation management under water scarcity. *Agr. Water Manage.* **2002**, 57, 175-206

6.7. APPENDIX A

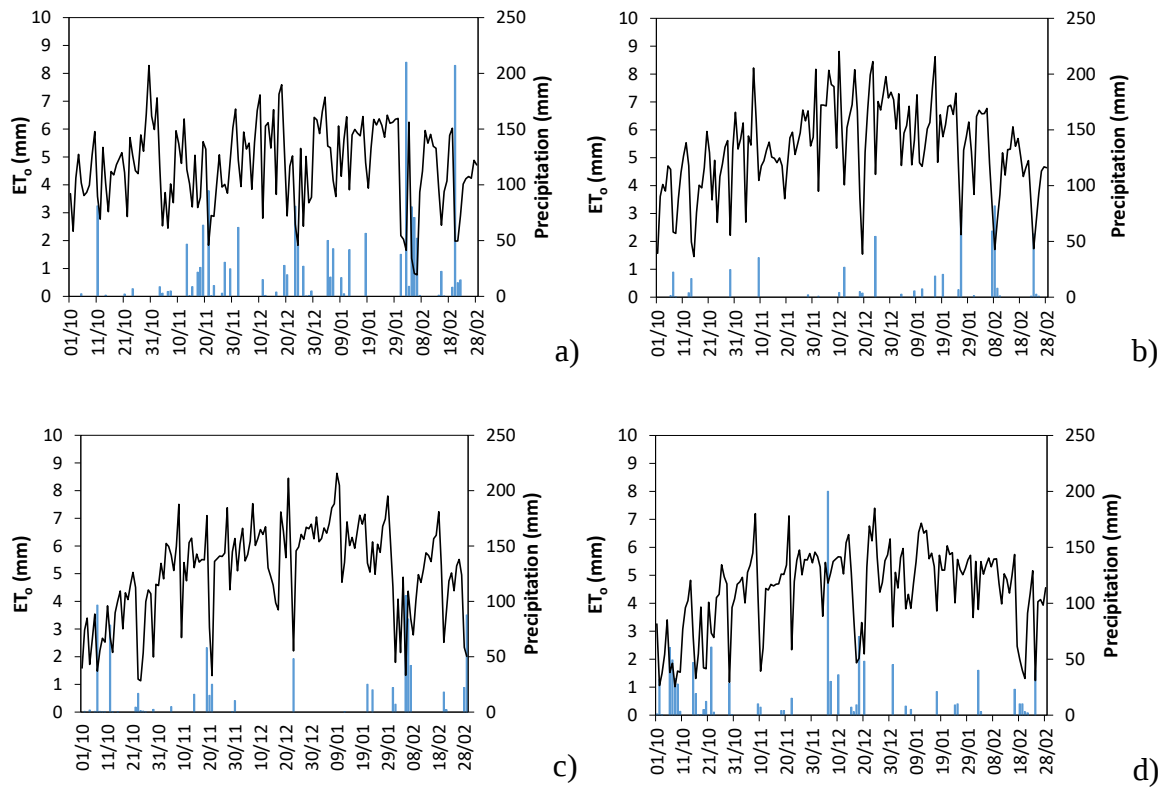


Figure A1. Daily precipitation (|) and reference evapotranspiration (—) during the soybean seasons of (a) 2009-2010, (b) 2010-2011, (c) 2011-2012 and (d) 2012-2013, Paysandú, Uruguay.

Table A1. Main soil hydraulic properties of the experimental site, Paysandú.

Layer depth (m)	Soil type 1				Soil type 2			
	θ_{sat} (cm ³ cm ³)	θ_{FC} (cm ³ cm ³)	θ_{WP} (cm ³ cm ³)	K_{sat} (cm day ⁻¹)	θ_{sat} (cm ³ cm ³)	θ_{FC} (cm ³ cm ³)	θ_{WP} (cm ³ cm ³)	K_{sat} (cm day ⁻¹)
0-0.20	0.52	0.36	0.16	57.4	0.46	0.30	0.14	40.5
0.20-0.60	0.52	0.45	0.29	64.7	0.50	0.40	0.26	50.2
0.60-1.00	0.54	0.37	0.19	65.4	0.47	0.32	0.18	51.5

θ_{sat} , θ_{FC} and θ_{WP} are respectively the soil water content at saturation, field capacity and wilting point; K_{sat} is the saturated hydraulic conductivity

Table A2. Crop growth stages dates and cumulated growing degree days (CGDD) for experimental seasons of 2011-12 and 2012-13.

		Crop growth stages			
Year		Initial	Crop development	Mid-season	Late-season
2011-12	Dates	11-11 to 29-11	30-11 to 20-12	21-12 to 04-03	05-03 to 09-04
	CGDD (°C)*	336	654	2015	2640
2012-13	Dates	03-12 to 17-12	18-12 to 17-01	18-01 to 24-03	24-03 to 25-03
	CGDD (°C)*	363	759	1894	2235

* values obtained using a base temperature of 5°C and a cut-off temperature of 30°C

Table A3. Net irrigation depths (mm) of all irrigation treatments in soybean seasons of 2011-12 and 2012-13

Irrigation depths					Irrigation depths				
Dates	FI	DI _{GFill}	DI _{Veg}	DI _{Veg-GFill}	Dates	FI	DI _{GFill}	DI _{Veg}	DI _{Veg-GFill}
16/11/2011	36	36	36	36	05/12/2012	18	18	18	18
05/12/2011	36	36			29/12/2012	54	54	54	54
10/12/2011	36				04/01/2013	36	36	36	54
14/12/2011	36				09/01/2013	36	36		36
19/12/2011	36	36			14/01/2013	36	36		
01/01/2012	48	54			21/01/2013	36	36		36
04/01/2012	36				28/01/2013	36	36		
09/01/2012	18	54		54	11/02/2013	36		54	54
20/01/2012			54		16/02/2013	54		54	
30/01/2012	36		36		15/03/2013		54		54
15/02/2012	36		36						
Total	354	216	162	90	Total	342	306	216	306

7. RESULTADOS PRINCIPALES Y DISCUSIÓN

7.1. MAÍZ

Las deficiencias hídricas provocadas en distintas etapas de desarrollo de maíz mostraron diferencias significativas en las variables analizadas. En el cuadro 1 se presentan los resultados de los ANOVAS para el rendimiento, número de granos (NG) por metro cuadrado, peso de mil granos (PMG), tasa de crecimiento del cultivo (TCC) en el PC, tasa de crecimiento de planta (TCP) en el PC, biomasa total (BT) e Índice de cosecha (IC), en las cuatro temporadas evaluadas. En el análisis, se detectaron diferencias significativas para tratamiento y año. Por otra parte, se comprobó la no significación de la interacción tratamiento por año.

El efecto significativo de los tratamientos se explicó por las diferentes disponibilidades hídricas, que causaron comportamientos distintos en las variables evaluadas. El efecto año, se justificó por las características climáticas no controladas como: la radiación solar, las temperaturas y las PP en las etapas de desarrollo de los cultivos en las que no se interceptaron PP, estas características del clima provocaron diferencias entre años.

En la primera temporada evaluada, las PP totales durante el periodo entre noviembre y febrero, en el que se desarrolló el maíz, casi cuadruplicaron al promedio de la región que es de 430 mm aproximadamente para los cuatro meses. Cabe indicar que la estimación de las PP efectivas, entendidas como las PP que ingresan al suelo por disponer de capacidad de almacenamiento, en la temporada 2009 fueron las más bajas en las cuatro temporadas evaluadas (cuadro 1A). En estas condiciones de PP excesivas, además hubo un elevado número de días nublados y numerosos eventos de PP que provocaron condiciones de baja radiación solar incidente en la mayor parte del ciclo (cuadro 2A). En la segunda y tercera temporada se presentaron características climáticas opuestas a las detalladas anteriormente, con PP menores y a su vez valores de radiación solar elevados. Por último, en la cuarta temporada se presentaron valores intermedios de PP y radiación solar a los mostrados en las tres temporadas anteriores. La variación en las características climáticas no controladas por la metodología experimental provocó respuestas diferenciales entre temporadas,

en las diferentes variables analizadas.

La interacción no significativa de tratamiento por año, permitió interpretar que la metodología experimental aplicada para evaluar el efecto de las deficiencias hídricas en distintas etapas de desarrollo de maíz fue útil y permitió manejar el AD en los experimentos en base a la planificación desarrollada.

Cuadro 1. Resultados de los análisis de varianza en las variables dependientes en maíz

Variable dependiente	Fuente de variación	Nivel de significación
Rendimiento	Tratamiento	***
	Año	***
	Tratamiento por año	NS
NG	Tratamiento	***
	Año	***
	Tratamiento por año	NS
PMG	Tratamiento	***
	Año	***
	Tratamiento por año	NS
TCC	Tratamiento	***
	Año	***
	Tratamiento por año	NS
TCP	Tratamiento	***
	Año	***
	Tratamiento por año	NS
BT	Tratamiento	***
	Año	***
	Tratamiento por año	NS
IC	Tratamiento	***
	Año	***
	Tratamiento por año	NS

NG= Número de granos por metro cuadrado; PMG=Peso de mil granos; TCC = Tasa de crecimiento de cultivo en periodo crítico; TCP = Tasa de crecimiento de planta en periodo crítico; BT= Biomasa total; IC=Índice de cosecha

*** muy significativo, ** significativo y NS no significativo.

7.1.1. **Rendimiento**

En primer lugar recordar que el objetivo central planteado en esta tesis doctoral pretendió determinar la sensibilidad del cultivo al estrés hídrico en diferentes etapas de desarrollo. En ese sentido, en maíz la generación de un déficit hídrico promedio de 141 mm en el PC (T2) generó una caída en el rendimiento de 43% con respecto al bienestar hídrico (T1). El T1 presentó consumos de agua totales que variaron de 466 a 610 mm, según las condiciones climáticas de cada temporada, principalmente las relacionadas con las precipitaciones y la acumulación de radiación solar. La disminución en el rendimiento del cultivo fue de 25% con deficiencias hídricas de 52 mm ubicadas en la etapa de llenado del granos (T3). En el caso de las deficiencias hídricas acumuladas en la etapa vegetativa y el PC (T4) cuantificadas en 248 mm en relación al T1 no agregaron mayores pérdidas que las provocadas sólo en el PC (T2). Las diferencias de consumo de agua entre el T2 y el T4 fueron de 107 mm a favor del T2 y no generaron diferencias significativas en rendimiento, por tanto se puede concluir que las deficiencias hídricas en la etapa vegetativa no agregaron mayores pérdidas de grano. Si bien es posible indicar que la etapa vegetativa es de menor sensibilidad a las deficiencias hídricas que las etapas reproductivas, no se puede determinar que la afectación del rendimiento es nula, ya que en el T4 el rendimiento fue afectado por las deficiencias hídricas acumuladas en el PC y la etapa vegetativa. No obstante, en trabajos futuros de manejo de riego deficitario, la etapa vegetativa debe ser considerada en la disminución de los aportes de agua y cabría esperar una afectación menor del rendimiento.

En la figura 1 se muestra el rendimiento de maíz obtenido en los cinco tratamientos evaluados, en las cuatro temporadas de estudio. Asimismo, en la figura 2 se presenta el rendimiento relativo promedio (%) de los tratamientos con deficiencias hídricas provocadas en diferentes etapas del ciclo (T2, T3, T4) y el secano (T5), en relación al testigo con bienestar hídrico en todo el ciclo (T1), para las cuatro temporadas.

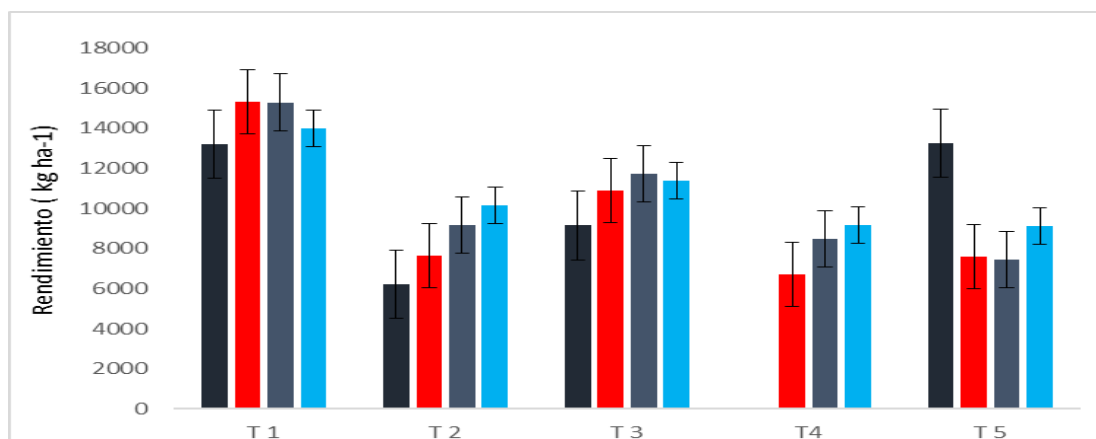


Figura 1. Rendimientos (kg ha^{-1}) de maíz, en los cinco tratamientos y en las cuatro temporadas evaluadas. Las columnas negras representan la temporada 2009, las rojas 2010, las azules 2011 y las celestes 2012. El T1 representa a bienestar hídrico, el T2 a deficiencias hídricas en el periodo crítico (PC), el T3 a deficiencias hídricas en el llenado de grano, el T4 a deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y el PC y el T5 a secano. Las barras verticales indican el desvío típico del tratamiento.

Los tratamientos con bienestar hídrico presentaron el rendimiento mayor y el mismo varió entre 13.500 y $15.300 \text{ kg ha}^{-1}$ aproximadamente. En la temporada 2009, los mayores rendimientos fueron obtenidos en conjunto con el tratamiento en secano, debido a la ocurrencia de PP extraordinarias ya comentadas que superaron los 1500 mm durante el ciclo de cultivo, esto determinó que en secano la disponibilidad hídrica no fuera limitante en todo el ciclo.

Como ya se comentó la mayor disminución del rendimiento fue provocada por deficiencias hídricas en el PC y por deficiencias en la etapa vegetativa y el PC.

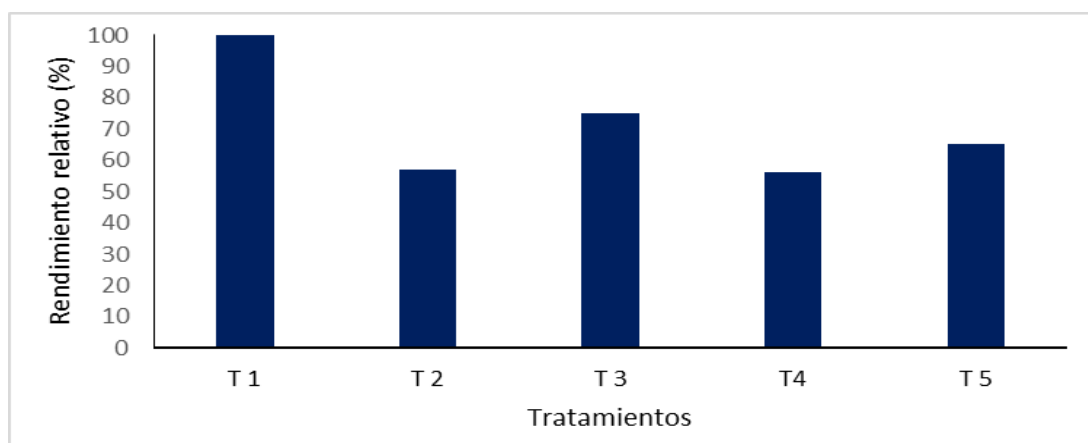


Figura 2. Rendimiento relativo (%) promedio de maíz para las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012 en los tratamientos evaluados. El T1 representa a bienestar hídrico en todo el ciclo, el T2 deficiencias hídricas en el periodo crítico (PC), el T3 deficiencias hídricas en el llenado de grano, el T4 deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y el PC y el T5 en secano.

La disminución intensa del rendimiento por deficiencias hídricas en el entorno de la floración de maíz se debió a que en esta etapa se determina el componente principal del rendimiento que es el NG por superficie (Cárcova et al., 2003b). La disponibilidad hídrica es uno de los principales factores del ambiente que afecta el crecimiento, ya que el flujo transpiratorio está directamente relacionado a la fijación de CO₂, con disponibilidades de agua favorables para el cultivo, el volumen de agua que puede transpirar es mayor y por tanto el CO₂ fijado por las plantas es superior. El rendimiento en grano está estrechamente asociado con la transpiración y la fijación de CO₂ (Dardanelli et al., 2003). En cambio, en condiciones de deficiencias hídricas, el cultivo cierra los estomas y se interrumpe la fijación de CO₂ afectando la producción de biomasa. Asimismo, en maíz las deficiencias afectan la sincronización de las floraciones masculina y femenina y con ello se compromete la determinación del número de espigas por superficie y del NG por espiga y como consecuencia se produce la afectación negativa del NG por superficie (Jacobs y Pearson 1991, Kiniry y Ritchie 1985). De esta manera, las restricciones hídricas en el PC perjudican al principal componente del rendimiento en maíz. La especie posee crecimiento determinado, por tanto, no hay posibilidades de compensar el NG en etapas posteriores del ciclo.

Por otra parte, las pérdidas de rendimiento en maíz, por causa de deficiencias hídricas en el llenado de granos, que es una etapa no crítica (ENC) de determinación del rendimiento fue significativamente menor a las deficiencias ocurridas en el PC. En maíz, como se indicó, el llenado de granos no es la etapa reproductiva de mayor importancia, sin embargo, la falta de agua afectó el PMG y provocó la disminución detectada de rendimiento. No obstante, el PMG es un componente del rendimiento de menor jerarquía que el NG por superficie, en la determinación del rendimiento (Cárcova et al., 2003b).

La variabilidad de las PP en las cuatro temporadas de estudio permitió confirmar la inestabilidad del rendimiento de maíz en secano y la dependencia del volumen y la distribución de las PP en la definición del rendimiento. En los secanos, el rendimiento varió desde los más altos logrados en la temporada 2009 a los más bajos

obtenidos en 2011. Este comportamiento fue consecuencia de la variación de las PP entre temporadas. La escasa capacidad de almacenamiento de AD del suelo en relación a las necesidades totales de agua del cultivo y las altas demandas atmosféricas de los meses de verano, causan baja autonomía hídrica y por ende una fuerte dependencia de las recargas del suelo, para cubrir las necesidades hídricas del maíz. Las recargas hídricas provienen casi exclusivamente de las PP, ya que las napas en general se encuentran a profundidades a las que el sistema radicular del maíz no logra profundizar, por tanto, las necesidades de agua del cultivo deben ser necesariamente cubiertas por las PP.

La variabilidad del volumen y de la distribución de las PP provoca bajos rendimientos en relación al potencial y falta de estabilidad de los mismos en secano. Los resultados logrados en secano en la temporada 2009 no son habituales, en general las demandas atmosféricas de los meses de diciembre y enero, en los que se ubica el PC de maíz, para siembras de mediados de octubre, no son cubiertas por las PP. Sin embargo, en temporadas especiales clasificadas como años “Niño” severos, como la temporada 2009, los excesos hídricos ocurren durante la mayor parte del ciclo y se cubren los requerimientos de agua del maíz sin riego.

7.1.2. Componentes del rendimiento

La forma clásica de descomponer el análisis del rendimiento en cultivos de granos es a través de sus componentes numéricos principales, es decir el NG por unidad de superficie y el PMG.

En las figuras 3 y 4, se presenta la relación del rendimiento con el NG por superficie y el PMG respectivamente, obtenidas para los cinco tratamientos evaluados, en las cuatro temporadas de estudio. En la figura 3 se puede ver que el rendimiento de maíz se relacionó significativamente con el NG por superficie, esta relación ha sido ya documentada (Cárcova et al. 2003b, Andrade et al. 1996). Por tanto, nuevamente se constató que, para obtener rendimientos elevados en maíz, se requiere, necesariamente, lograr un NG por superficie alto. Los rendimientos máximos, para los ambientes de producción en los que se desarrollaron los experimentos, se lograron con un NG por metro cuadrado que varió entre 4500 y 6400

aproximadamente. El NG final en maíz se determina en el entorno de la floración, de allí la importancia decisiva de la disponibilidad hídrica en esta etapa. La ocurrencia de condiciones de estrés hídrico y de cualquier otro tipo en el entorno de la floración afectan en forma negativa el NG y por lo tanto el rendimiento.

Por el contrario, el PMG no mostró relación con el rendimiento de maíz, también ha sido demostrado por varios autores la escasa correspondencia que posee el PMG con el rendimiento, ya que el mismo es un componente residual, es decir se determina principalmente con los recursos que quedan en la planta y en el ambiente luego de definido el NG. Por lo tanto, es habitual la existencia de rendimientos elevados y PMG con valores medios e incluso bajos. En cambio, si las condiciones no son extremas durante el llenado de granos, cuando el NG es bajo el PMG generalmente es alto. Asimismo, se debe considerar que el PMG es afectado por el estado fisiológico del cultivo durante la etapa de llenado de granos y por el genotipo.

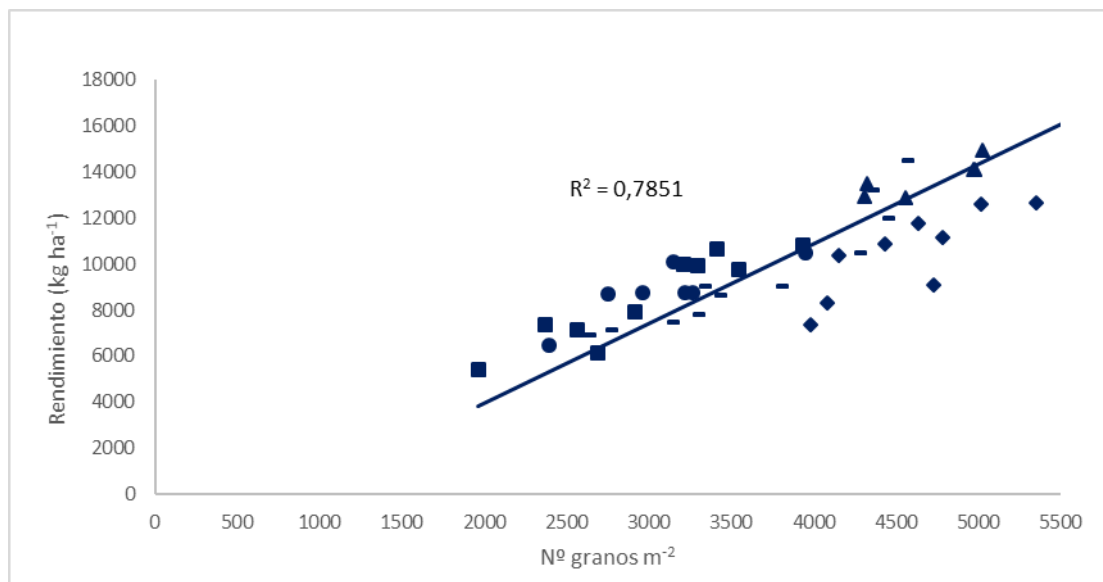


Figura 3. Relación entre el rendimiento en grano (kg ha^{-1}) y el número de granos por metro cuadrado de maíz, incluyendo las repeticiones de los tratamientos con bienestar hídrico (T1) $\blacktriangle$, deficiencias hídricas en el periodo crítico (PC) (T2) $\blacksquare$, deficiencias hídricas desde etapa vegetativa hasta R3 (T3) $\bullet$, deficiencias hídricas en etapa vegetativa y PC (T4) $\blacklozenge$ y secano (T5) $\times$ evaluados en las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012.

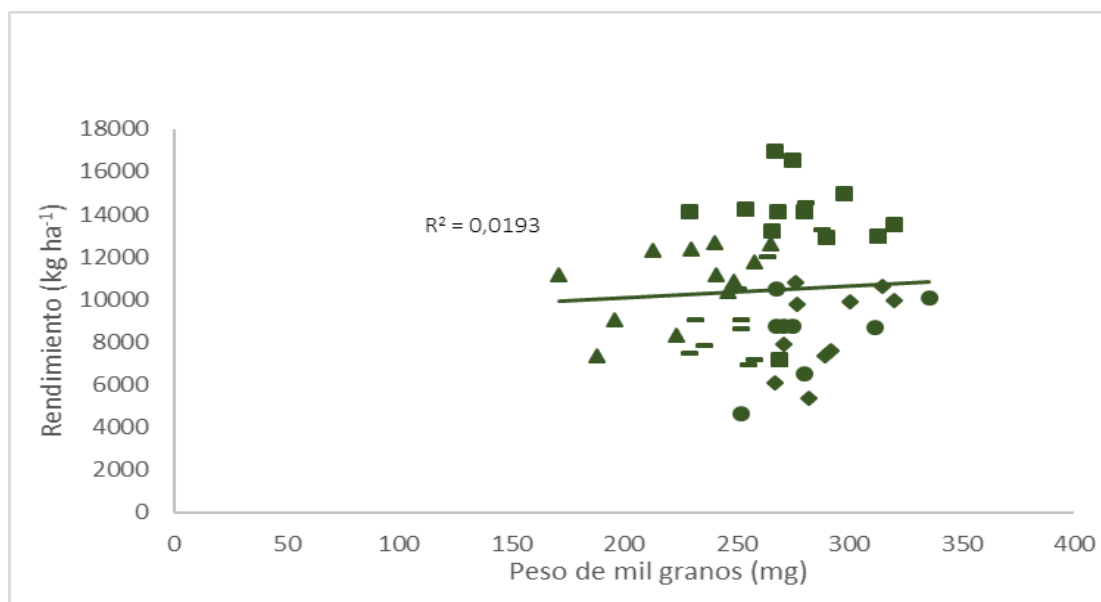


Figura 4. Relación entre el rendimiento en grano (kg ha^{-1}) y el peso promedio de grano (mg) de maíz incluyendo repeticiones de los tratamientos con bienestar hídrico (T1) ■ , deficiencias hídricas en el periodo crítico (PC) (T2) ♦ , deficiencias hídricas desde etapa vegetativa hasta R3 (T3) ▲ , deficiencias hídricas en etapa vegetativa y PC (T4) ● y secano (T5) ✕ evaluados en las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012.

Para estas variables, los resultados de los ANOVAS fueron similares a los obtenidos en el rendimiento (cuadro 1). En síntesis, se detectó efectos significativos de tratamiento y de año, tanto para el NG por superficie como para el PMG y no hubo significación de la interacción tratamiento por año, se interpretan los resultados obtenidos en los ANOVAS de la misma manera que para el rendimiento en grano.

7.1.3. **Producción de biomasa total e Índice de cosecha**

Como ya fuera indicado, otra forma de analizar el rendimiento en grano es a través del producto de la BT producida y el IC. Los ANOVAS de las cuatro temporadas, en ambas variables, presentaron efecto significativo de tratamiento y de año. A su vez, la interacción año por tratamiento no presentó significación. Este resultado, se interpretó en forma similar a los análisis realizados para el rendimiento y los componentes numéricos del rendimiento. El tratamiento con bienestar hídrico fue el que mostró el mayor volumen de BT depositado en las cuatro temporadas, a su vez presentó diferencias significativas con los tratamientos con deficiencias hídricas

provocadas en las diferentes etapas. El tratamiento que tuvo deficiencias hídricas acumuladas en la etapa vegetativa y el PC fue el que fijó un menor volumen de BT. La respuesta en deposición de BT fue la esperada, ya que el bienestar hídrico permitió desarrollar el proceso de fotosíntesis sin inconvenientes y depositar el volumen potencial de BT. En cambio, el tratamiento con deficiencias hídricas acumuladas en la etapa vegetativa y el PC fue el más perjudicado en el proceso de fotosíntesis y en el crecimiento del cultivo debido a la mayor duración de las deficiencias hídricas.

El crecimiento determinado del maíz provoca que la disminución en la deposición de biomasa en la etapa vegetativa no es compensada en otras etapas del ciclo. Además, si las deficiencias hídricas continúan en las fases reproductivas de fijación de granos, los daños sobre la biomasa son acumulativos y por tanto mayores.

En cambio, en los tratamientos con deficiencias hídricas en el PC en la etapa vegetativa se depositó el potencial de biomasa aérea sin embargo la BT se perjudicó por el menor NG fijado. En el caso de las deficiencias hídricas en el llenado de granos, no fue afectada la deposición de biomasa en la etapa vegetativa, ni el NG por superficie, sin embargo, se vio afectada la BT por un menor peso de los granos.

En la figura 5, se muestra un gráfico biplot con el comportamiento del rendimiento, la BT y el IC. El rendimiento y la BT en maíz presentaron claramente una relación positiva, en cambio el IC muestra una relación débil con el rendimiento. La relación positiva BT y rendimiento es esperable, ya que los tratamientos con deficiencias hídricas severas que afectan la deposición de BT en las etapas reproductivas afectaron los componentes principales del rendimiento y por tanto la productividad del cultivo. Para lograr rendimientos elevados es necesario depositar biomasa en la mayor parte del ciclo, por tanto, es lógico que exista un relacionamiento positivo entre la BT y el rendimiento.

Las TCC y TCP durante el PC mayores se lograron lógicamente en los tratamientos que no presentaron deficiencias hídricas en el PC es decir el de bienestar hídrico y el que presentó deficiencias hídricas en el llenado de granos. A su vez, estos tratamientos, obtuvieron los rendimientos mayores. Ambas variables, muestran los efectos del crecimiento del maíz durante el PC, que como ya fue extensamente

analizado es la etapa en que se fija el NG y el estado fisiológico durante la misma es determinante del NG final. Como fuera registrado por diferentes autores las TCC y TCP durante el PC, son dos buenos estimadores del estado fisiológico del cultivo en esta etapa (Andrade et al., 1996, Cárcova et al., 2003b)

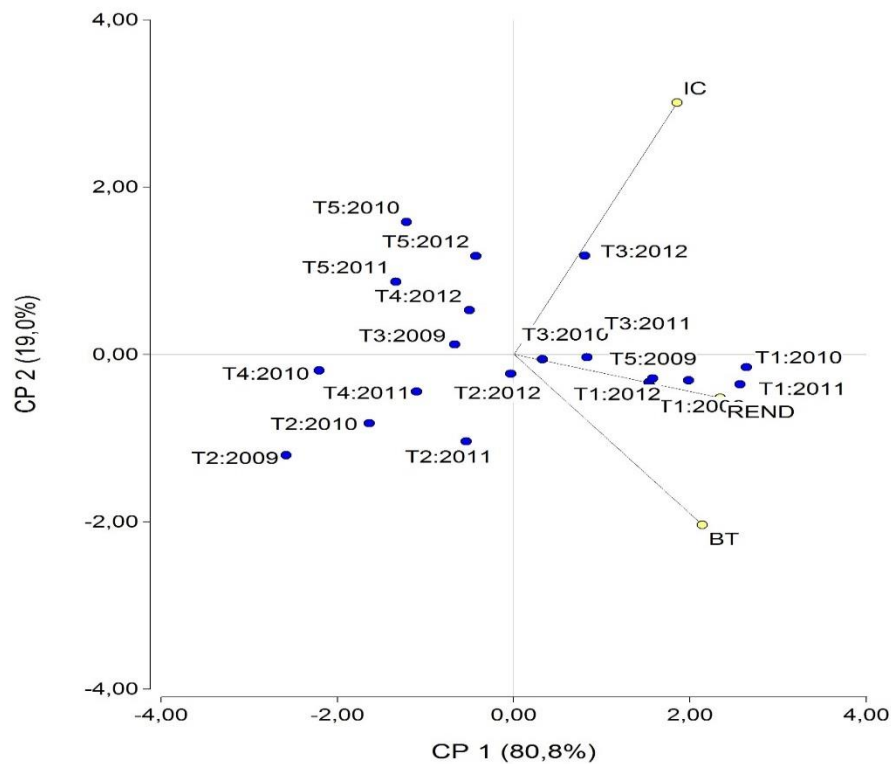


Figura 5. Gráfico biplot de rendimiento (REND) y biomasa total (BT) e Índice de cosecha (IC) en maíz para las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012 en los tratamientos evaluados. El T1 representa a bienestar hídrico en todo el ciclo, el T2 deficiencias hídricas en el periodo crítico (PC), el T3 deficiencias hídricas en el llenado de grano, el T4 deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y el PC y el T5 a seco.

7.2. SOJA

En el cuadro 2 se muestran los resultados del ANOVA general para las cuatro temporadas y los cinco tratamientos de las variables: rendimiento, NG por superficie, PMG promedio, TCC y TCP en el PC, BT e IC. En el análisis se detectó efecto de los tratamientos en las variables: rendimiento, NG, BT, TCC y TCP. En cambio, en PMG e IC los tratamientos no presentaron significación.

Por otra parte, el efecto año fue significativo en las variables estudiadas excepto en el IC, esto se debió a la variabilidad entre años de las características climáticas no controladas en los experimentos, principalmente la radiación solar y las PP durante las etapas en que no hubo control.

Como se observa en el cuadro 2 la interacción tratamiento por año no fue significativa, en la mayoría de las variables analizadas.

Por tanto, interpretamos que la metodología experimental aplicada permitió cumplir con los objetivos y evaluar los efectos de las diferentes disponibilidades hídricas en distintas etapas de desarrollo, en la mayoría de las variables estudiadas. El efecto tratamiento detectado en rendimiento, NG, BT, TCC y TCP, se justificó por la disponibilidad hídrica diferencial. En cambio, el PMG no presentó significación, esta respuesta se debe al comportamiento residual del PG en relación al NG fijado conjuntamente con la fuerte determinación genética que posee este componente en soja.

Cuadro 2. Nivel de significación de los análisis de varianzas de las variables dependientes medidas en soja.

Variable dependiente	Fuente de variación	Nivel de significación
Rendimiento	Tratamiento	***
	Año	***
	Tratamiento por año	NS
NG	Tratamiento	***
	Año	***
	Tratamiento por año	NS
PMG	Tratamiento	NS
	Año	***
	Tratamiento por año	***
TCC	Tratamiento	***
	Año	**
	Tratamiento por año	NS
TCP	Tratamiento	***
	Año	**
	Tratamiento por año	NS
BT	Tratamiento	***
	Año	***
	Tratamiento por año	NS
IC	Tratamiento	NS
	Año	NS
	Tratamiento por año	NS

NG= Número de granos por metro cuadrado; PMG=Peso de mil granos; TCC = Tasa de crecimiento de cultivo en periodo crítico; TCP = Tasa de crecimiento de planta en el periodo crítico; BT= Biomasa total; IC=Índice de cosecha. *** muy significativo, ** significativo y NS no significativo.

7.2.1. **Rendimiento**

En soja la generación de un déficit 64 mm durante el PC (T2) provocó una caída en el rendimiento de 35% con respecto al bienestar hídrico (T1), nuevamente se detectaron variaciones en el consumo de agua del T1 entre 416 y 547 mm de acuerdo a las condiciones variables de las precipitaciones y la radiación solar entre temporadas. La disminución en el rendimiento del cultivo fue de 15% con

deficiencias hídricas de 78 mm ubicadas entre la etapa vegetativa y R3 (T3), es decir en las etapas no críticas, previas al PC. En el caso de las deficiencias hídricas acumuladas en la etapa vegetativa y el PC (T4) cuantificadas en 122 mm, al igual que en maíz, prácticamente no agregaron mayores pérdidas que las provocadas sólo en el PC, la disminución del rendimiento fue de 36% en relación al T1. En soja la información muestra la misma tendencia que la observada en maíz, es decir con deficiencias hídricas en el PC las deficiencias en la etapa vegetativa no agregan mayores pérdidas de rendimiento. Sin embargo, para elaborar estrategias de riego deficitario se deberán profundizar los estudios, ya que la etapa vegetativa en soja puede ser más relevante que en maíz debido a que la soja tiene posibilidades de compensación vegetativa y reproductiva que el maíz no posee. Por tanto las deficiencias ubicadas en la etapa vegetativa pueden afectar los mecanismos de compensación como el número de nudos fructíferos y por consiguiente la viabilidad de las yemas que son las que pueden generar ramas y compensar vegetativa y reproductivamente etapas con estrés. En síntesis en estudios posteriores de manejo del riego en soja se deberá contemplar abastecer de agua a demanda durante el PC, sin que ocurran deficiencias importantes en la etapa vegetativa.

En la figura 6, se muestra el rendimiento en grano obtenido en los distintos tratamientos evaluados en las cuatro temporadas de estudio.

En la figura 6 se puede constatar que con bienestar hídrico la soja presentó los mayores rendimientos en las cuatro temporadas. El tratamiento con bienestar presentó rendimientos que variaron entre 4900 y 7300 kg ha⁻¹, aproximadamente. Esta variación entre temporadas interpretamos que se debió a las diferencias en la radiación solar incidente, en las temporadas de estudio, la cual influyó en la determinación del rendimiento. No obstante, al ser la soja una especie C3 igualmente se constató una elevada respuesta productiva a condiciones de alta radiación solar con disponibilidad hídrica no limitante, como las ocurridas en el tratamiento con bienestar en las temporadas 2010 y 2011.

Los tratamientos que mostraron mayor disminución del rendimiento fueron los que presentaron deficiencias hídricas en el PC, tanto en situaciones de deficiencias solo en el PC, como con deficiencias acumuladas en el PC y la etapa vegetativa.

En el caso de las deficiencias hídricas provocadas en las ENC previas al PC del cultivo, es decir desde la etapa vegetativa a R3, las disminuciones del rendimiento fueron menores que con deficiencias en el PC. En las deficiencias en ENC el crecimiento del cultivo en el PC no estuvo limitado por la disponibilidad hídrica, esto permitió la fijación de un NG elevado, no obstante, las pérdidas en rendimiento fueron del orden del 15% en relación al tratamiento con bienestar hídrico por las deficiencias ocurridas en la etapa vegetativa y en las primeras fases reproductivas. Es importante destacar que en los secanos se lograron rendimientos elevados y estables, en las cuatro temporadas. Este comportamiento, presentó notorias diferencias con el mostrado en maíz. La explicación encontrada fue que la disponibilidad hídrica en la etapa de mayor importancia para la determinación del rendimiento, es decir el llenado de granos, fue ajustada a los requerimientos del cultivo. El llenado de granos se ubicó mayoritariamente en el mes de febrero y las PP ocurridas durante ese mes, en tres de las cuatro temporadas estudiadas, cubrieron los requerimientos de agua debido a que las PP fueron abundantes y en el caso de la temporada 2012 que presentó las PP menores, las mismas superaron los 120 mm y con una buena distribución. Por tanto, la interpretación que se realizó, acerca de los rendimientos de secano en soja es que la disponibilidad hídrica durante el PC, a través de las PP ocurridas, permitió que no existieran deficiencias hídricas de significación en las cuatro temporadas. Por otra parte, en las etapas fenológicas restantes las deficiencias hídricas existieron, pero no fueron prolongadas, por tanto, los secanos mostraron rendimientos relativamente elevados. El comportamiento de las PP ocurrido en las cuatro temporadas durante los meses de febrero no es estable, sino que ocurrió coyunturalmente.

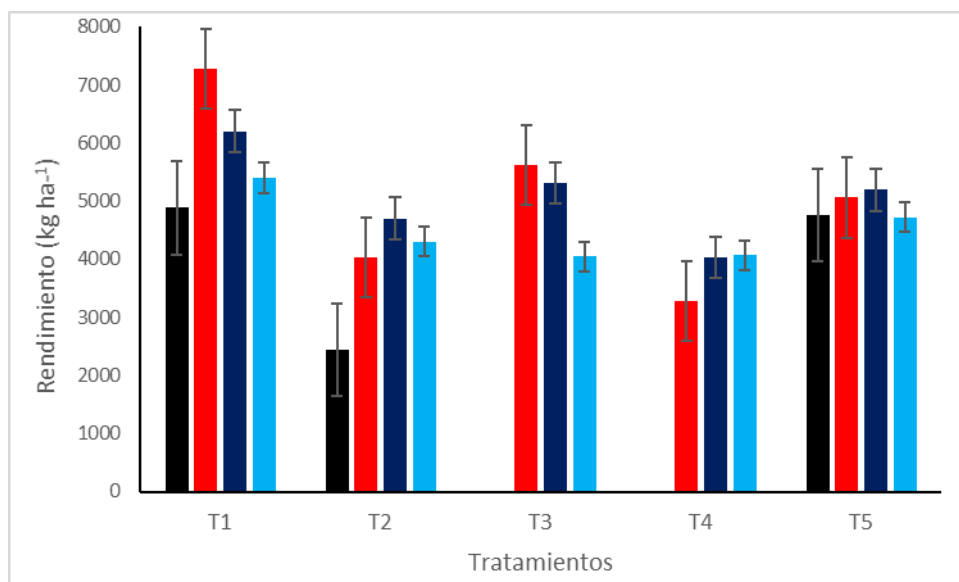


Figura 6. Rendimiento (kg ha^{-1}) de soja en 2009, 2010, 2011 y 2012, en los tratamientos con: bienestar hídrico (T1), deficiencias hídricas en el periodo crítico (PC) (T2), deficiencias hídricas desde etapa vegetativa hasta R3 (T3), deficiencias hídricas en etapa vegetativa y el PC (T4) y secano (T5). Las barras verticales indican el desvío típico en cada tratamiento.

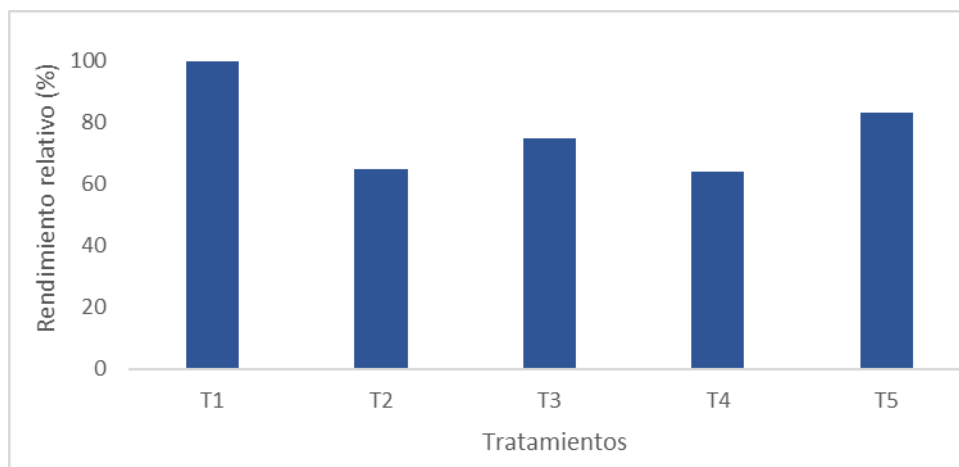


Figura 7. Rendimiento relativo (%) promedio de soja en las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012, en los tratamientos con bienestar hídrico (T1), deficiencias hídricas en el periodo crítico (PC) (T2), deficiencias hídricas desde etapa vegetativa hasta R3 (T3), deficiencias hídricas en etapa vegetativa y PC (T4) y secano (T5).

7.2.2. **Componentes del rendimiento**

En la figura 8, se observa la relación entre el NG por unidad de superficie y el rendimiento para los cinco tratamientos y las cuatro temporadas evaluadas. El componente numérico que explicó mejor la variación del rendimiento fue el NG por superficie. En ese sentido, se verificó que los tratamientos con bienestar hídrico presentaron el rendimiento mayor y el NG por metro cuadrado más elevado, no obstante, presentó una variación entre las temporadas evaluadas de 2400 a 4600.

Se constató un coeficiente de determinación elevado que indica la fuerte relación entre ambas variables, si bien el mismo es menor al obtenido en maíz, se sostiene que para la obtención de elevados rendimientos es necesario, también en soja, presentar un elevado NG por superficie. Como ya se indicó la etapa en la que se determina definitivamente el NG es principalmente el llenado de granos (R4-R6), no obstante, se comienza a determinar desde la floración, de todas maneras, la etapa más crítica es el llenado de granos y es en esta etapa en la que la disponibilidad hídrica mostró un efecto principal en la determinación del NG.

En la figura 9, se presenta la relación entre el rendimiento y el PMG, en tres de las cuatro temporadas, el PMG no presentó diferencias entre los tratamientos evaluados y los que mostraron un menor rendimiento fueron aquellos que presentaron un PMG mayor. Esta respuesta, se debió a la baja significancia del PMG en explicar el rendimiento debido a ser un componente residual. La bibliografía indica mayor significación del PMG en la determinación del rendimiento en soja que en maíz, no obstante, nuestros resultados como se ve en la figura 9 mostraron en soja débil relación con el rendimiento.

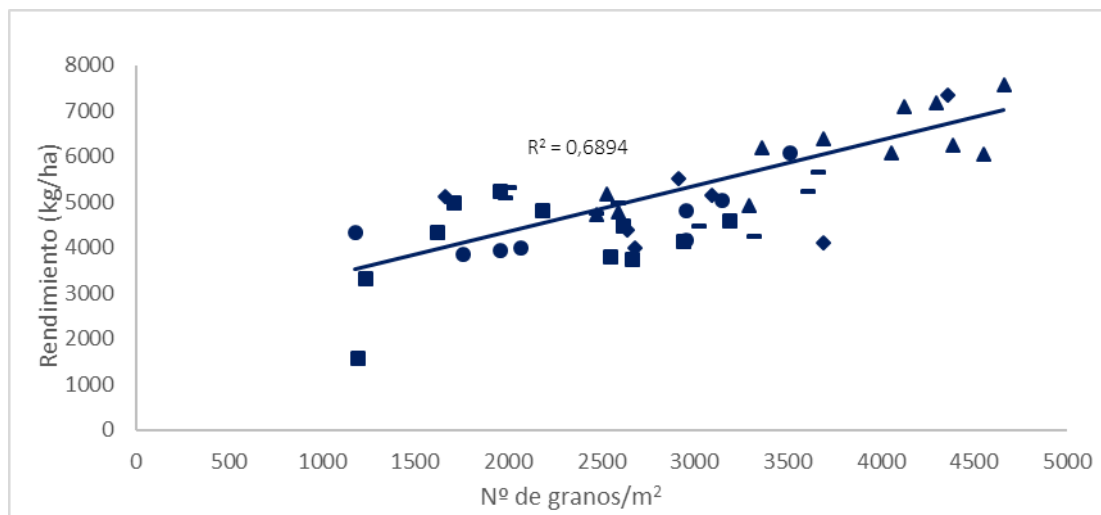


Figura 8. Relación entre el rendimiento en grano (kg ha^{-1}) y el número de granos por metro cuadrado de soja en los tratamientos con bienestar hídrico (T1) $\blacktriangle$, deficiencias hídricas en el periodo crítico (PC) (T2) $\blacksquare$, deficiencias hídricas desde etapa vegetativa hasta R3 (T3) $\blacklozenge$, deficiencias hídricas en etapa vegetativa y PC (T4) $\bullet$ y secano (T5) $\times$, evaluados en las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012.

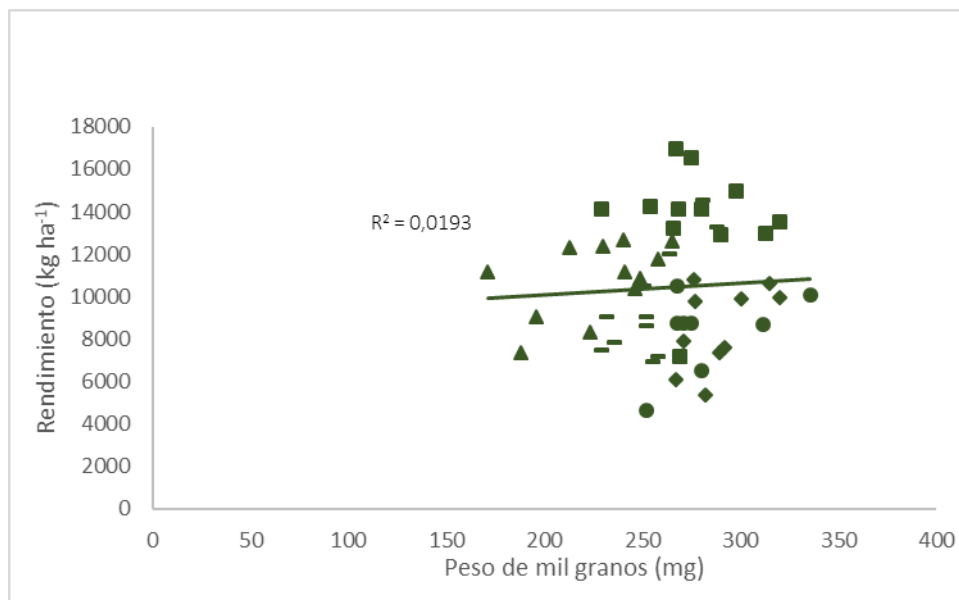


Figura 9. Relación entre el rendimiento en grano (kg ha^{-1}) y el peso promedio de grano (mg) de soja de los tratamientos con bienestar hídrico (T1) $\blacksquare$, deficiencias hídricas en el periodo crítico (PC) (T2) $\blacklozenge$, deficiencias hídricas desde etapa vegetativa hasta R3 (T3) $\blacktriangle$, deficiencias hídricas en etapa vegetativa y PC (T4) $\bullet$ y secano (T5) $\times$ evaluados en las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012.

En la figura 10 se muestra un gráfico biplot en el que se observa la variación del rendimiento y los componentes numéricos principales NG por superficie y PMG. Se puede apreciar la relación entre el rendimiento y el NG y por el contrario la casi nula relación con el PMG. Asimismo, se observa que en general los rendimientos mayores se orientan a los tratamientos con bienestar y a los que presentaron deficiencias en ENC, en cambio los que presentaron deficiencias hídricas en el llenado de granos mostraron una dirección contraria a los rendimientos elevados.

Por otra parte, al igual que en maíz, es posible en soja analizar el rendimiento como el producto de la BT y el IC. En ese sentido, en la figura 11 se muestra un gráfico biplot con estas tres variables, se destaca la relación positiva entre el rendimiento y la BT depositada, en cambio el IC no muestra una relación clara con el rendimiento. Los tratamientos que presentaron mayor deposición de BT fueron los de bienestar hídrico y en contraste los tratamientos con menor deposición de BT fueron los que presentaron deficiencias hídricas en el PC. Las temporadas 2010 y 2011 en los tratamientos sin deficiencias hídricas fueron las que mostraron los mayores rendimientos y volúmenes de BT. Estos resultados se argumentan en que ambas temporadas presentaron valores de radiación solar elevados y escasas PP. Asimismo, el IC en soja no tuvo relación con el rendimiento y no se detectaron diferencias entre tratamientos para esta variable.

En relación a las TCC y TCP en el PC, no hubo diferencias significativas, no obstante, en las cuatro temporadas, se encontró una tendencia de que las mayores TCC fueron obtenidas en los tratamientos con bienestar y con deficiencias en ENC e igualmente que en rendimiento las menores tasas de crecimiento en los tratamientos con deficiencias en el PC y en el PC y la etapa vegetativa. Las mayores tasas de crecimiento avalan el mejor estado fisiológico del cultivo y con ello la posibilidad de concretar elevados NG por superficie y altos rendimientos.

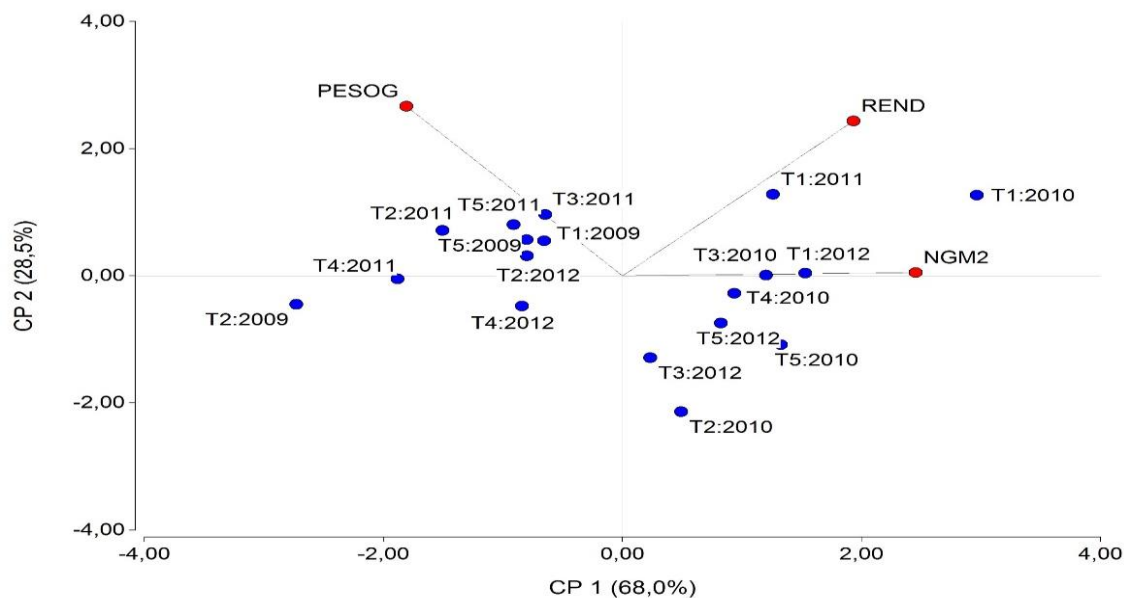


Figura 10. Gráfico biplot de rendimiento (REND) y componentes principales del rendimiento, número de granos (NG) por superficie y peso de grano (PESOG), en soja en las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012, en los tratamientos con bienestar hídrico (T1), deficiencias hídricas en el periodo crítico (PC) (T2), deficiencias hídricas desde etapa vegetativa a R3 (T3), deficiencias hídricas en etapa vegetativa y el PC (T4) y secano (T5).

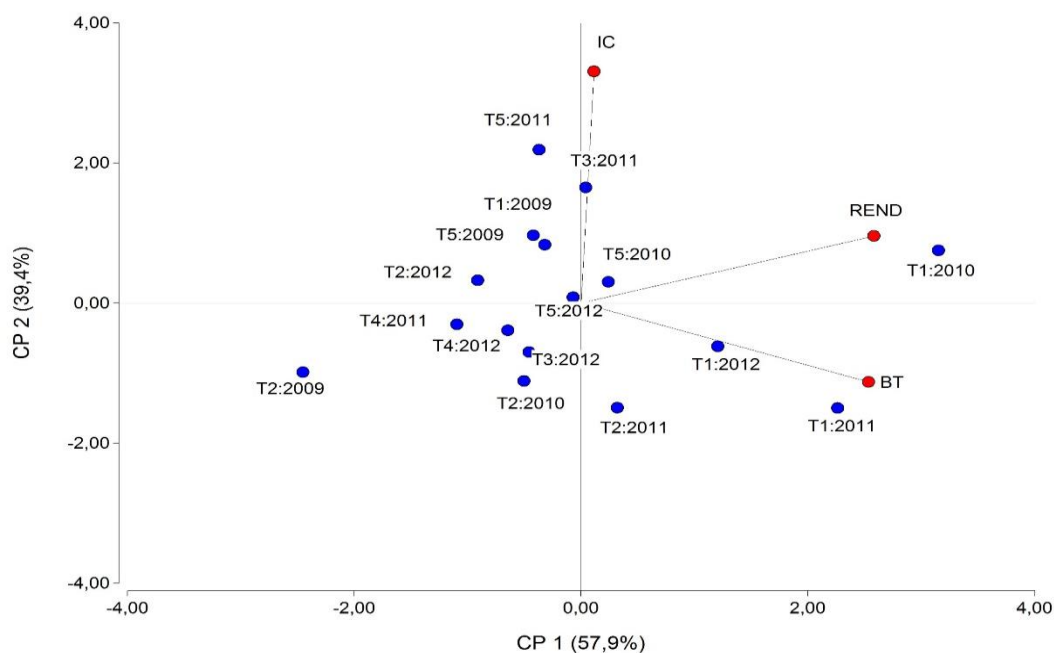


Figura 11. Gráfico biplot de rendimiento (REND), biomasa total (BT) e índice de cosecha (IC), en soja, en las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012, en los tratamientos con bienestar hídrico en todo el ciclo (T1), deficiencias hídricas en el periodo crítico (PC) (T2), deficiencias hídricas en etapas no críticas previas al PC abarcando desde etapa vegetativa a R3 (T3), deficiencias hídricas acumuladas en etapa vegetativa y PC(T4) y secano (T5).

7.3. CONSUMO DE AGUA

7.3.1. Maíz

7.3.1.1. **Evapotranspiración total**

En la figura 12, se muestra la evapotranspiración total calculada para los cinco tratamientos evaluados, en las cuatro temporadas de estudio. El T1 con bienestar hídrico lógicamente presentó el mayor consumo de agua y varió entre 460 y 603 mm. La temporada 2009 fue la que presentó menor consumo en todos los tratamientos, excepto en el T5 en seco, que mostró un consumo similar al tratamiento con bienestar. El menor consumo de agua en la temporada 2009 en relación a las restantes temporadas evaluadas, se debió a la escasa demanda atmosférica la que afectó negativamente la radiación solar incidente. En las temporadas 2010, 2011 y 2012, el consumo de agua de los secos fue variable y menor que en la temporada 2009 y en todos los casos inferior al consumo con bienestar hídrico.

Como ya se indicó las temporadas 2010 y 2011 presentaron características opuestas a 2009, ya que, durante la mayor parte del ciclo, las PP fueron escasas. En 2011, el seco, presentó un consumo de agua similar al tratamiento con deficiencias acumuladas el T4 que fue el tratamiento con las mayores deficiencias hídricas y en 2010 el seco mostró incluso, un consumo menor que en 2011. En la temporada 2012 la mayoría de los tratamientos presentaron consumos de agua intermedios debido al comportamiento de las PP anteriormente comentado.

En las cuatro temporadas el consumo de agua del T2 en relación al T1 varió entre 69 y 75%, el del T3 entre 89 y 91%, el del T4 entre 63 y 66% y el T5 entre 53 y 93%.

El consumo de agua menor, en promedio, lo mostró el T4 y para las cuatro temporadas varió entre 333 y 398 mm, debido a que las deficiencias hídricas acumuladas durante la etapa vegetativa y el PC fueron las más extensas entre las evaluadas. El T2 con deficiencias hídricas sólo en el PC, presentó consumos mayores al T4, pero a su vez menores que el T3 con deficiencias solo en el llenado de granos.

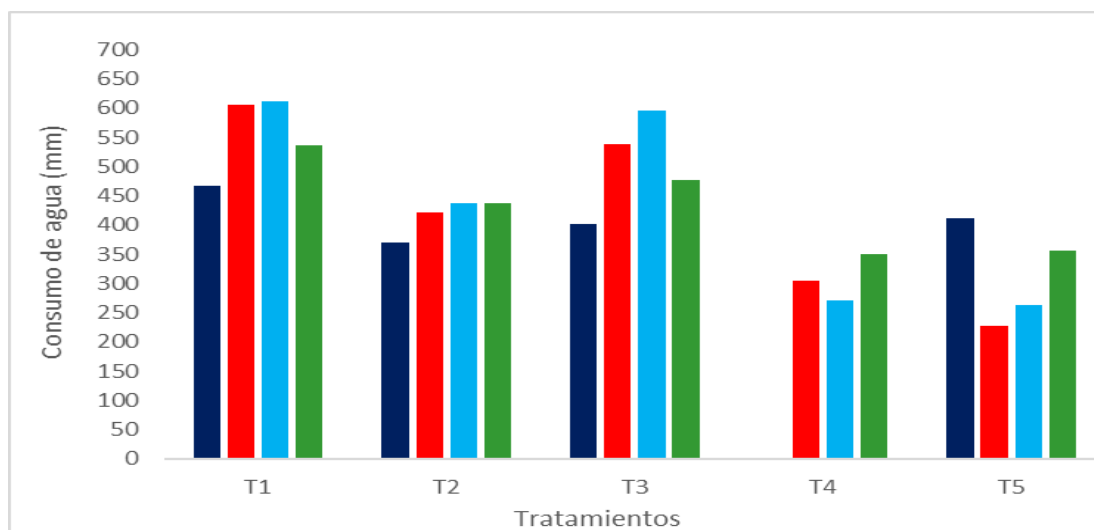


Figura 12. Evapotranspiración de cultivo total (mm) en maíz para los tratamientos de bienestar hídrico (T1), deficiencias hídricas en el periodo crítico (PC) (T2), deficiencias hídricas en el llenado de grano (T3), deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y PC (T4) y secano (T5). La temporada 2009 se representó en columnas azules, 2010 en columnas rojas, 2011 en columnas celestes y 2012 en columnas verdes.

En el T1 el entorno de la floración presentó el mayor consumo de agua, entre las etapas analizadas y varió entre 38 y 40% del consumo total (figura 1A). En definitiva, se constató que cuando no existen deficiencias hídricas, el PC es la fase del ciclo de mayor consumo de agua en maíz. Por tanto, el entorno de la floración es la etapa de mayor importancia fisiológica en la determinación del rendimiento y a su vez es la de mayor exigencia cuantitativa en disponibilidad hídrica. El consumo de agua elevado durante el PC se justifica por la coincidencia temporal con las demandas atmosféricas mayores debido a la combinación de temperaturas y radiación solar elevadas que ocurren desde fines de diciembre a mediados de enero. En la región normalmente las mayores demandas atmosféricas suceden entre la segunda quincena de diciembre y la primera de enero, con los registros mayores de radiación solar y temperaturas. Estos factores climáticos, conjuntamente con el crecimiento del cultivo que alcanza la mayor altura y la mayor cobertura del suelo por el cultivo, en el entorno de la floración, provocan consumos de agua elevados en esta etapa del ciclo. El T1 tanto en la etapa vegetativa como en la etapa de llenado de granos, presentó consumos menores a los que ocurrieron en el entorno de la floración. En las etapas no críticas, el consumo de agua varió entre 27 y 34% del

total, siendo variable entre temporadas la preminencia de una etapa sobre la otra.

En los tratamientos con deficiencias hídricas provocadas (T2, T3 y T4), obviamente las etapas con menor consumo fueron las que presentaron deficiencias hídricas. En ese sentido, en el T2 la etapa con menor consumo de agua fue el entorno de la floración, en el T3 el llenado de granos y en el T4 las etapas vegetativas y el PC. En las etapas sin deficiencias, en estos tratamientos, los consumos de agua fueron similares a los estimados en el T1.

El T5 fue el tratamiento con mayor variabilidad en el consumo de agua, en las distintas etapas. El consumo del secano dependió de la ocurrencia de PP y como las temporadas presentaron PP variables, la disponibilidad de agua fue igualmente variable. No obstante, como se indicó anteriormente en general durante la etapa de llenado de granos la disponibilidad hídrica fue adecuada a los requerimientos.

7.3.1.2. **Riego**

En el cuadro 3 se presenta el riego aplicado en cada tratamiento y temporada evaluada, se observa la variación del consumo de riego para un mismo tratamiento, en las diferentes temporadas estudiadas. No obstante, si en el análisis se descarta la temporada 2009, debido a las extremas PP ocurridas que distorcionan los resultados, se constata que las diferencias en el consumo de riego entre temporadas para un mismo tratamiento existen, sin embargo, la variación disminuye sustancialmente y se adecua a las deficiencias planificadas. El T1 fue el tratamiento con mayor volumen de riego y en promedio para las tres temporadas indicadas consumió 424 mm y el T4 con deficiencias acumuladas en la etapa vegetativa y el PC, fue el de menor consumo de riego y el promedio fue de 162 mm. En el caso de los T2 y T3 mostraron un consumo de agua de riego intermedio al T1 y T4, ya que las deficiencias hídricas fueron provocadas en una sola etapa del ciclo. El T2 presentó un promedio de riego de 253 mm y el T3 mostró un promedio de riego de 340 mm para las tres temporadas analizadas.

El T2 fue regado con menor volumen que el T3 debido a que las deficiencias hídricas en el T2 fueron provocadas en el periodo de mayor consumo de agua debido a la coincidencia temporal del PC de maíz con las mayores demandas atmosféricas para

siembras realizadas en la segunda quincena de octubre.

Cuadro 3. Consumo de riego (mm) en maíz para los tratamientos con bienestar hídrico (T1), deficiencias hídricas en el periodo crítico (PC, T2), deficiencias hídricas en el llenado de grano (T3), deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y PC (T4) y secano (T5), en las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012

Temporada/ Tratamiento	T1	T2	T3	T4
2009	158	30	112	-
2010	490	280	367	173
2011	428	246	396	147
2012	354	234	256	165

En cambio, las deficiencias hídricas provocadas en el T3 fueron en la etapa de llenado de granos ubicada principalmente en la tercera década del mes de enero y en el mes de febrero, etapas del año en que las demandas atmosféricas disminuyen en relación a la tercera década de diciembre y las dos primeras de enero, en las que se ubicó temporalmente el PC de maíz.

7.3.1.3. Productividad del riego

Para el análisis de la productividad del riego no fue considerada la temporada 2009, ya que las características extremas de dicha temporada distorsionan los resultados, además las PP totales de 2009 presentan escasa repetibilidad. Por tanto, a nuestro entender la inclusión de esta temporada no aporta información válida para analizar la productividad del riego en maíz, no obstante, se debe considerar que en la región pueden ocurrir temporadas excepcionales con condiciones similares a las de 2009.

La productividad del riego definida como el cociente entre el rendimiento diferencial entre los tratamientos con bienestar hídrico y secano, y el riego (mm) aportado a los tratamientos con bienestar hídrico, varió entre 1,4 y 1,8 kg/m³ con un valor medio de 1,6 kg/m³, para las tres temporadas estudiadas.

En el caso de analizar la diferencia de rendimiento entre los tratamientos con

bienestar hídrico y los que presentaron deficiencias en el PC, la productividad del agua indirecta calculada como el cociente entre la diferencia de rendimientos y la diferencia de consumos de riego, entre los tratamientos indicados, varió entre 3,2 y 3,7 kg /m³ con una media de 3,4 kg/m³. La productividad entre bienestar hídrico y el tratamiento con deficiencias acumuladas en la etapa vegetativa y el PC varió entre 2,4 y 2,6 kg/m³ con una media de 2,5 kg/m³ para las tres temporadas.

En base a los resultados, se infiere que la mayor productividad del riego en maíz se logra con el riego en el PC, este comportamiento es lógico ya que en esta etapa se define el NG final por superficie. Los resultados muestran que las deficiencias hídricas en el PC provocan las mayores disminuciones del rendimiento, por tanto, la aplicación de riego en el entorno de la floración lógicamente mostró la mayor productividad del riego durante todo el ciclo. Esto no implica que regar solo en el PC sea la mejor alternativa, ya que las restantes etapas aportan en conjunto un mayor porcentaje al rendimiento que la aportada por el riego en el propio PC, no obstante, en cualquier estrategia de manejo de riego diferente al riego completo o “full” que se decida implementar se deberá considerar la elevada sensibilidad del PC a las deficiencias hídricas y la importancia que el crecimiento del cultivo posee en esta etapa para la determinación del rendimiento en maíz.

7.3.2. Soja

7.3.2.1. **Evapotranspiración total**

En la figura 13, se muestra la evapotranspiración de cultivo total calculada para los diferentes tratamientos y temporadas evaluadas. El tratamiento con bienestar hídrico presentó el mayor consumo de agua en el ciclo, el mismo varió entre 429 y 547 mm, para las temporadas evaluadas. En relación al resto de los tratamientos, el T2 con deficiencias en el llenado de granos consumió entre 74 y 92% del consumo del T1. El T3 con deficiencias desde la etapa vegetativa a R3, mostró un consumo de agua que varió entre 63 y 88% del T1. El T4 con deficiencias acumuladas en la etapa vegetativa y el PC, presentó un consumo de agua que varió entre 50 y 72% del estimado para el T1.

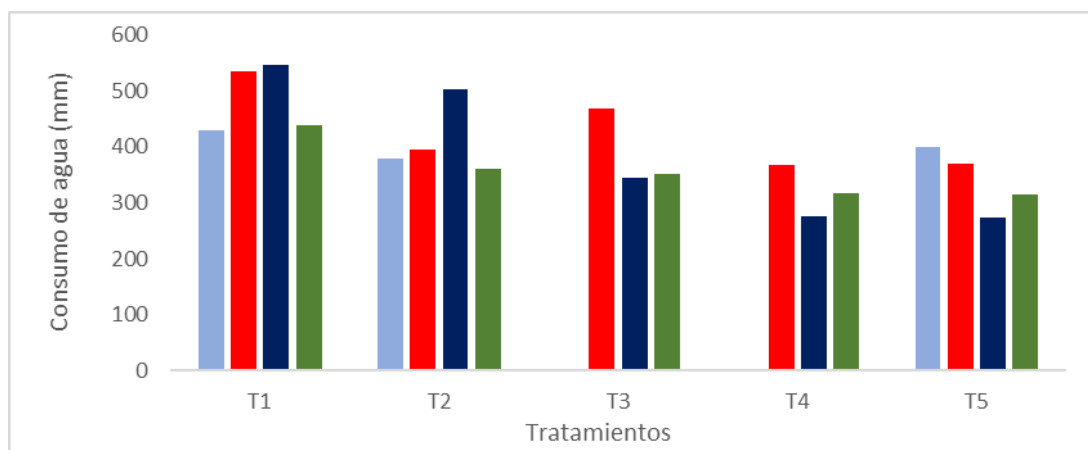


Figura 13. Evapotranspiración de cultivo (mm) total estimada en soja para los tratamientos con bienestar hídrico (T1), deficiencias hídricas en el periodo crítico (PC, T2), deficiencias hídricas desde la etapa vegetativa a R3 (T3), deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y PC (T4) y secano (T5). La temporada 2009 se representa en las columnas celestes, 2010 en las columnas rojas, 2011 en las columnas azules y 2012 en las columnas verdes.

En secano, el consumo de agua fue altamente variable entre temporadas, y los valores fueron de 50 a 93% en relación al T1. La amplitud en las diferencias del consumo de agua de los secanos se debió a la variabilidad de las PP entre temporadas, característica de la región. De la misma manera que ocurrió en maíz el consumo de agua del T5 fue similar al T1 con bienestar hídrico en la temporada 2009, dadas las características particulares de las PP de dicha temporada. Por otra parte, el consumo de los secanos en las temporadas 2010 y 2011 fue del entorno del 50% del T1 debido a las PP escasas en dichas temporadas en relación al consumo potencial de agua del cultivo.

El llenado de granos fue la etapa del ciclo con mayor consumo de agua en soja (figura 2A), no obstante, en este caso, no coincide con las máximas demandas atmosféricas, ya que esta etapa se ubicó mayoritariamente en el mes de febrero. Las mayores demandas atmosféricas se ubicaron a fines de la etapa vegetativa y en la floración durante los meses de diciembre y enero. Por tanto, la demanda atmosférica diaria durante el llenado de grano fue menor, pero la longitud de la etapa de llenado de granos provocó que fuera la etapa que presentó el mayor consumo de agua.

Los T3 con deficiencias hídricas acumuladas desde la etapa vegetativa a R3 y los T4 con deficiencias en la etapa vegetativa y el llenado de grano, presentaron consumos menores que el T2.

7.3.2.2. Riego

En el cuadro 4 se muestra el riego aplicado en los tratamientos y temporadas evaluadas. Si se analiza la información en forma similar a la realizada en maíz y no se considera la temporada 2009, se puede observar que el tratamiento con bienestar hídrico fue el que presentó lógicamente el mayor consumo de riego con 363 mm promedio para las tres temporadas. Los tratamientos con deficiencias hídricas en el PC y el tratamiento con deficiencias desde la etapa vegetativa a R3, mostraron un consumo de riego similar de 200 mm promedio aproximadamente. Por otra parte, los tratamientos con deficiencias acumuladas en la etapa vegetativa y el PC fueron los que recibieron el menor aporte con 70 mm aproximadamente de riego promedio para las tres temporadas. Las variaciones en la aplicación de riego para cada tratamiento entre temporadas se debió a la variabilidad que se produjo en las demandas evaporativas atmosféricas en las temporadas evaluadas.

Cuadro 4. Consumo de riego (mm) en soja para para los tratamientos de bienestar hídrico (T1), deficiencias hídricas en el periodo crítico (T2), deficiencias hídricas desde la etapa vegetativa a R3 (T3), deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y PC (T4) y secano (T5), para las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012.

Temporada/ Tratamiento	T1	T2	T3	T4
2009	75	0	0	-
2010	414	151	216	0
2011	371	262	162	54
2012	304	178	223	153

7.3.2.3. Productividad del riego

La productividad del riego se calculó a través del cociente entre las diferencias de rendimiento entre el T1 con bienestar hídrico y el T5 en secano y el riego realizado en los tratamientos con bienestar hídrico, este cociente se expresó en kg/m³. La productividad del riego para soja varió entre 0,26 y 0,68 kg/m³ y un promedio de 0,4 kg/m³ para las tres temporadas analizadas.

Se constataron claras diferencias con la productividad de maíz la cual fue cuatro veces superior, las cuales están basadas en los diferentes costos metabólicos por fijar sustancias de reserva en el grano de maíz y soja. En maíz la reserva principal en el grano está compuesta por almidón, en cambio la soja almacena mayoritariamente proteína y aceite en el grano, sustancias que poseen un contenido energético superior al almidón. Los cultivos con alto contenido proteico poseen baja productividad del agua (Steduto y Albrizio, 2005).

Por otra parte, se calculó indirectamente la productividad del riego en el PC, a través del cociente entre la diferencia de rendimiento entre el bienestar hídrico y el tratamiento con deficiencias hídricas en el PC, y la diferencia de riego aplicado entre tratamientos. Los resultados mostraron una variación para las tres temporadas que fue de 1,2 a 1,5 kg/m³ y un valor medio de 1,4 kg/m³. En definitiva, a través del cálculo indirecto la productividad del agua de riego en el PC sería 3,5 veces superior a regar durante todo el ciclo. La relación indirecta calculada de la productividad del agua del riego en el PC y durante todo el ciclo en soja es superior a la encontrada en maíz. Asimismo, se calculó indirectamente la productividad de regar en las etapas no críticas, a través del cociente entre las diferencias de rendimiento entre los tratamientos de bienestar hídrico y el de deficiencias hídricas desde la etapa vegetativa a R3 y la diferencia de riego aplicado entre tratamientos. La productividad indirecta calculada para estos tratamientos varió entre 0,4 y 1,7 con una media de 1 kg/m³, en definitiva, fue menor que la calculada para el PC y superior a la productividad presentada para el riego durante todo el ciclo.

En síntesis, los resultados acerca de la productividad del agua de riego muestran en ambos cultivos que regar durante todo el ciclo, es menos eficiente que regar durante el PC, esto se debe a la sensibilidad que poseen los cultivos al crecimiento en el PC. Estas respuestas deberían ser consideradas a la hora de definir estrategias de manejo del agua de riego diferentes al riego completo. Asimismo, la soja que demuestra mayor plasticidad en la determinación del rendimiento mostró una relación más fuerte que el maíz a favor del riego en el PC que el riego en todo el ciclo. Este aspecto puede ser la base para estudiar y explorar estrategias de manejo del riego diferentes en ambos cultivos.

8. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Los rendimientos de maíz y soja logrados con bienestar hídrico en todo el ciclo fueron significativamente superiores a los obtenidos en condiciones de restricciones hídricas provocadas en diferentes etapas de desarrollo y secano. La soja con bienestar hídrico logró producciones de biomasa y rendimiento en grano, cercanos a los máximos registrados para la especie. Por tanto, se infiere que en el litoral norte del país existen las condiciones ambientales, edáficas y conocimientos de manejo necesarios para incrementar significativamente la producción de soja, en la medida que se levanten las restricciones hídricas que el cultivo presenta en secano. En maíz, bajo las mismas condiciones hídricas, las producciones de biomasa total y rendimiento fueron elevadas, sin embargo, la productividad lograda fue inferior al potencial que presenta la especie en otras regiones, dado que es una especie de tipo fotosintético C4, inferimos que la radiación solar y las temperaturas locales, limitan la producción de biomasa y la expresión de rendimientos superiores. Los rendimientos más elevados en maíz y en soja fueron obtenidos en las temporadas con radiaciones solares mayores, coincidiendo con los años de PP más bajas.

Las deficiencias hídricas provocadas durante los PC de determinación del rendimiento, causaron las mayores disminuciones del rendimiento, cuantificadas en 43% para el maíz y 35% para la soja, promedio, para las cuatro temporadas. Los PC ubicados en el entorno de la floración en maíz y en la fructificación avanzada y el llenado de granos en soja, fueron las etapas del ciclo de mayor sensibilidad a la falta de agua, debido a que, en esas etapas, se determina el número de granos por superficie definitivo y éste es el principal componente del rendimiento. En la medida que existan restricciones al crecimiento del cultivo, en este caso por falta de agua, el número de granos fijados por superficie descende y con ello disminuye el rendimiento en grano.

Las deficiencias hídricas provocadas en la etapa de llenado de granos en maíz mostraron disminuciones del rendimiento promedio de 25%, en relación al cultivo

sin deficiencias. Durante el llenado de granos, se define el peso del grano, que es un componente de menor jerarquía que el número de granos en la determinación del rendimiento, por tanto, la disminución del rendimiento por falta de agua en el llenado de granos fue inferior a la ocurrida en el PC. De todas maneras, los efectos de las deficiencias hídricas en esta etapa, sobre la productividad del maíz fueron significativos y luego del PC el llenado de granos fue la etapa en que las deficiencias hídricas en maíz provocaron las disminuciones del rendimiento más importantes.

En soja las deficiencias hídricas, en las etapas no críticas para la determinación del rendimiento evaluadas, ubicadas entre la etapa vegetativa y primeras etapas reproductivas (R1-R3), mostraron pérdidas de rendimiento de 15% promedio, en relación al bienestar hídrico. La etapa vegetativa en soja es de extensa duración y no es inhibida por el inicio del desarrollo reproductivo, asimismo, en la floración (R1-R2) la especie produce más flores que las que realmente concreta. Estos mecanismos morfo-fisiológicos del cultivo junto al crecimiento indeterminado de la soja, colaboran a que las pérdidas de rendimiento por deficiencias de agua en las etapas no críticas sean relativamente bajas.

Las deficiencias hídricas acumuladas en la etapa vegetativa y el PC de maíz y de soja, no agregaron, prácticamente, disminuciones de rendimiento a las constatadas con deficiencias sólo en el PC. La etapa vegetativa interviene menos en la definición de los componentes principales del rendimiento, esto provoca que su efecto en la determinación del mismo sea menor. Los resultados confirman la información de la bibliografía, que indica que las deficiencias en las primeras etapas de los cultivos no presentan, en general, efectos mayores sobre el rendimiento. Como se indicó anteriormente la soja posee cierta plasticidad ante situaciones de estrés, por tanto, es lógico que las deficiencias hídricas durante la etapa vegetativa no agreguen disminuciones del rendimiento mayores.

En cambio, el maíz no posee la plasticidad de la soja, dado su crecimiento determinado, sin embargo, las deficiencias hídricas en las primeras etapas del ciclo disminuyeron la deposición de biomasa durante la etapa vegetativa, pero no

afectaron el rendimiento. Se infiere que la producción de biomasa aérea, en estas condiciones, fue suficiente para los rendimientos logrados con deficiencias acumuladas en la etapa vegetativa y el PC. Sin embargo, es probable que en caso de que las deficiencias hídricas hubieran sido evaluadas sólo en la etapa vegetativa, los rendimientos hubieran sido inferiores a los obtenidos con bienestar hídrico en todo el ciclo, ya que el aparato vegetativo disminuido, no hubiera sido suficiente para fijar el potencial de número y peso de los granos.

En secano, la disminución media del rendimiento en relación al bienestar hídrico fue de 35% para maíz y 18% para soja. En base al análisis de las PP de las cuatro temporadas, se deduce que la escasa disminución del rendimiento de soja se debió principalmente a las condiciones hídricas favorables durante la ocurrencia de los PC del cultivo. Las PP durante febrero, en que se ubicó mayoritariamente el PC de soja, en tres de las cuatro temporadas fueron superiores a los registros medios. Las deficiencias hídricas ocurridas en ambos cultivos en secano, estuvieron afectadas por la capacidad de almacenamiento de agua disponible (CAAD) del suelo. La efectividad media de las PP totales, en base a la CAAD, indicó que en maíz fue de 52% y en soja de 59%. Es altamente probable que la efectividad de las PP sea un factor que intervenga significativamente en la disponibilidad hídrica de los cultivos de maíz y soja realizados en secano, ya que el suelo de los experimentos posee una CAAD similar a la media de los suelos agrícolas del litoral.

El consumo de agua estimado para maíz con bienestar hídrico fue de 556 mm y en secano de 315 mm, promedio para las cuatro temporadas. En soja, el consumo con bienestar hídrico fue de 488 mm y en secano de 339 mm. Los cultivos en secano presentaron un déficit en el consumo de agua de 43% en maíz y 30 % en soja. Los resultados obtenidos reafirman estimaciones anteriores, acerca de las deficiencias hídricas que presentan el maíz y la soja, realizados en secano. En maíz, las etapas del ciclo con los mayores consumos coincidieron con las demandas atmosféricas más elevadas, ubicadas entre la segunda quincena de diciembre y la primera de enero. En soja, los requerimientos mayores del cultivo los presentó durante febrero con

demandas atmosféricas menores que las de diciembre-enero. Las etapas del ciclo de mayor consumo fueron, en ambos cultivos, los PC de determinación del rendimiento, responsables del 39 y 30% del consumo total de agua en maíz y soja, respectivamente. En ese sentido, se probó que los PC en maíz y soja fueron las etapas del ciclo con disminuciones del rendimiento mayores por deficiencias hídricas y a su vez, con el mayor consumo de agua.

La productividad del agua de riego en maíz fue cuatro veces superior que la de soja, esto se debió al contenido energético de la sustancia de reserva de los granos. En maíz la mayor parte del grano es almidón y la soja presenta un alto porcentaje de proteínas y aceite en el grano. Por tanto, se requiere un mayor costo energético para producir soja que maíz, el cual influye en la productividad del agua de riego.

En ambos cultivos, el cálculo indirecto de la productividad del agua de riego en el PC mostró resultados superiores a la productividad del riego en todo el ciclo. En soja el incremento porcentual fue superior al constatado en maíz. Como ya fuera mencionado, la soja presenta posibilidades de compensar situaciones de estrés en diferentes etapas, esto colabora en que la productividad del agua de riego en todo el ciclo sea relativamente baja. En cambio, cuando el estrés hídrico en soja ocurre en el llenado de granos, las posibilidades de compensar en etapas posteriores del ciclo son bajas, ya que luego del PC comienzan las etapas de maduración. Además, en el llenado de granos de soja, se define una parte significativa de los dos componentes principales del rendimiento: número y peso de granos. Los dos aspectos mencionados ayudan a comprender el incremento significativo de la productividad del agua de riego en el PC de soja, en relación al riego en todo el ciclo.

La calibración del modelo Aquacrop (AQ) de FAO para maíz, fue desarrollada en condiciones de bienestar hídrico a través del ajuste de los coeficientes principales que determinan la curva de cobertura del cultivo (CC) que es un parámetro esencial para el modelo. Estos ajustes permitieron estimaciones de biomasa y rendimiento satisfactorias. La validación del modelo se realizó en situaciones de deficiencias hídricas provocadas en diferentes etapas de desarrollo y en secano, donde AQ mostró

un pobre comportamiento en la simulación del rendimiento y la biomasa, en maíz. En secano, el modelo presentó comportamientos diferentes de acuerdo a las características hídricas de la temporada. En la temporada que el maíz en secano no presentó deficiencias hídricas, por la ocurrencia de PP abundantes, AQ simuló bien el rendimiento y la biomasa, al igual que en las situaciones de bienestar hídrico provocadas a través de riego en todo el ciclo. En cambio en las temporadas con deficiencias hídricas los resultados de las simulaciones presentaron errores. Es probable que los diferentes coeficientes de estrés que utiliza el modelo para los balances hídricos de suelos, no se encuentren ajustados para deficiencias hídricas severas y por tanto las simulaciones no fueron acertadas.

Aquacrop fue calibrado para soja y evaluado en diferentes situaciones de disponibilidad hídrica: bienestar hídrico, deficiencias hídricas en etapas no críticas, deficiencias en el PC, deficiencias en la etapa vegetativa y el PC y secano. En condiciones hídricas favorables AQ estimó bien la biomasa y el rendimiento en soja. En cambio, el modelo mostró errores en las simulaciones en condiciones de estrés hídrico severo. En las simulaciones que desarrolla AQ presenta elevada importancia la transpiración del cultivo, la cual está estrechamente ligada a la cobertura del canopeo y al agua disponible. Por tanto, es posible que, bajo condiciones de estrés severo como las evaluadas, los diferentes coeficientes de estrés de AQ no se encuentren bien ajustados en soja para simular situaciones de deficiencias hídricas y por consiguiente la simulación de biomasa y rendimiento no fueron favorables.

Los resultados de los experimentos mostraron los efectos que provocan las deficiencias de agua sobre la productividad de maíz y soja y, a su vez, el elevado potencial de rendimiento que poseen ambos cultivos, en la medida en que se levanten las limitantes hídricas que imponen: la variabilidad de las PP, las elevadas demandas atmosféricas en los PC y la baja capacidad de almacenamiento de agua de los suelos. La sensibilidad diferencial a las deficiencias hídricas en las distintas etapas de desarrollo de maíz y soja y los elevados costos directos de la energía para riego, son argumentos suficientes para profundizar estudios en estrategias de riego deficitario

(RD) y riego deficitario controlado (RDC). El RD es una estrategia de optimización que busca incrementar la productividad del agua y requiere conocimientos precisos de la respuesta al estrés en cada etapa de desarrollo. La cuantificación de las disminuciones del rendimiento evaluadas en las distintas etapas aportó la base de información para elaborar y evaluar estrategias de RDC que consideren el objetivo de maximizar las tasas fotosintéticas de los cultivos con un menor aporte de agua que la estrategia de riego completo. Se deberán considerar las diferencias en respuesta a las deficiencias hídricas encontradas entre maíz y soja, y, con esa base, diseñar alternativas de RDC en cada cultivo. La evaluación de estrategias de manejo del riego que disminuyan el consumo, mejoren la productividad del agua y bajen los costos directos del riego, permitiría aportar información que colabore en incrementar la adopción del riego con mayor solidez y generar conocimientos más precisos para optimizar el manejo del agua tecnificado en maíz y en soja.

La información generada permitió evaluar la sensibilidad a las deficiencias hídricas de distintas etapas de desarrollo de maíz y soja. Es necesario profundizar esa información estudiando estrategias de manejo del agua que contemplen disminuciones de los umbrales de riego. Estos estudios aportarían información en el mismo sentido que las estrategias de RDC propuestas, es decir incrementos en la productividad del agua.

La necesidad de generalizar la información para diferentes ambientes y condiciones climáticas requiere profundizar estos estudios con un modelo de simulación que permita evaluar los efectos en la productividad del maíz y de la soja con diferentes manejos del agua de riego. Asimismo, la herramienta de simulación debería incluir un módulo para evaluar económicamente distintas alternativas de riego. Generar un modelo de simulación de estas características permitiría aportar información a la toma de decisiones objetivas en el manejo del riego de maíz y soja para diferentes escenarios económicos.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Abrecht DG, Carberry PS. 1993. The influence of water deficit prior to tassel initiation on maize growth, development and yield. *Field Crops Research*. 31 (1): 55-69.
- Ali, MH. 2010. Crop Water Requirement and Irrigation Scheduling. In: Ali MH. (ed.) *Fundamentals of Irrigation and On-farm Water Management*. Springer New York, USA. (1): 399-452.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy. 300 p.
- Andrade FH, Sadras VO. 2000. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. In: Andrade FH, Sadras VO. eds. *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. Buenos Aires, Argentina. Estación Experimental Agropecuaria INTA Balcarce. Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ciencias Agrarias. 173-206.
- Andrade FH, Cirilo A, Uhart S, Otegui ME. 1996. *Ecofisiología del cultivo de maíz*. Balcarce: La Barrosa, INTA Balcarce, FCA UNMP, Dekalb press. 292 p.
- Andrade FH, Ferreiro M. 1996. Reproductive growth of maize, sunflower and soybean at different source levels during grain filling. *Field Crops Research*. (48): 15-165.
- Andrade FH. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Research*. (41): 1-12.
- Andrade F, Gardiol J. 1995. Sequía y producción de los cultivos de maíz, girasol y soja. *Boletín técnico* 132. INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria EEA (Estación Experimental Agropecuaria) Balcarce, Buenos Aires, Argentina. 5-23.
- Andriani JM. 2002. Estrés hídrico en soja. *IDIA XXI, Oleaginosos: soja*. II (3): 48-51.

- Andriani JM, Andrade FH, Suero EE, Dardanelli JL. 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans. 1. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and its components. *Agronomie*. (11): 737-746.
- Ashley DA, Ethridge WJ. 1978. Irrigation effects on vegetative and reproductive development of three soybean cultivars. *Agronomy Journal*. (70): 467-71.
- Assmann SM, Shimazaki K. 1999. The Multisensory Guard Cell. Stomatal Responses to Blue Light and Abscissic Acid. *Plant Physiology*. 119 (3): 809-816.
- Aydinsakir K, Erdal S, Buyuktas D, Bastug R, Toker R. 2013. The influence of regular deficit irrigation applications on water use, yield, and quality components of two corn (*Zea mays* L.) genotypes. *Agricultural Water Management*. (128): 65-71.
- Azcón-Bieto J, Talón M. 2000. Fundamentos de fisiología vegetal. Madrid. España. 2ª Ed. McGraw Hill Interamericana. 650 p.
- Baethgen WE, Terra R. 2010. El riego en un clima cambiante. In: Seminario Internacional Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (1º, 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Boscana. Montevideo, Uruguay. 7-18.
- Benjamin JG, Nielsen DC, Vigil MF, Mikha MM, Calderon F. 2015. Cumulative deficit irrigation effects on corn biomass and grain yield under two tillage systems. *Agricultural Water Management*. (159): 107-114.
- Bennett JM, Sinclair TR, Muchow RC, Costello SR. 1987. Dependence of stomatal conductance on leaf water potential, turgor potential, and relative water content in field-grown soybean and maize. *Crop Science*. (27): 984-990.
- Bergonci JJ, Bergamaschi H, Santos AO, França S, Radin B. 2001. Eficiência da irrigação em rendimento de grãos e matéria seca de milho (En línea). *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 36 (7): 1-11. Consultado 24 enero de 2013. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2001000700004>.
- Board JE, Modali H. 2004. Dry matter accumulation predictors for optimal yield in soybean. *Crop Science*. (45): 1790-1799.
- Boyer JS. 1982. Plant productivity and environment. *Science*. (218): 443-448.

- Boyer JS. 1970. Differing sensitivity of photosynthesis to low leaf water potentials in corn and soybean. *Plant Physiology*. (46): 236-239.
- Brevedan RE, Egli DB. 2003. Short periods of water stress during seed filling, leaf senescence, and yield of soybean. *Crop Science*. (43): 2083-2088.
- Çakir R. 2004. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*. (89): 1–16.
- Cantagallo JE, Chimenti CA, Hall AJ. 1997. Number of seeds per unit area in sunflower, correlates well with a photothermal quotient. *Crop Science*. (37): 1780-1786.
- Carballo De Silva L. 1990. Manejo del riego en soya sembrada en suelos arenosos de la mesa de guanipa. *Agronomía Tropical (Venezuela)*. (40): 35-56.
- Cárcova J, Abeledo LG, López Pereira M. 2003a. Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes. En : Satorre EH, Benech RL, Slafer GA, de la Fuente EB, Miralles DJ, Otegui ME, Savin R. (eds.): *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires Argentina. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires (U.B.A). pp 133-163.
- Cárcova J, Borrás L, Otegui ME. 2003b. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en maíz. In: Satorre EH, Benech RL, Slafer GA, de la Fuente EB, Miralles DJ, Otegui ME, Savin R. (eds.): *Producción de granos. Producción de granos: Bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires Argentina. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires (U.B.A). pp 60-98.
- Cifre J, Bota J, Escalona JM, Medrano H, Flexas J. 2005. Physiological tools for irrigation scheduling in grapevine (*Vitis vinifera* L.). An open gate to improve water-use efficiency? *Agriculture, Ecosystems and Environment*. (106): 159-170.
- Cirilo AG, Andrade FH. 1994a. Sowing date and maize productivity: I Crop growth and dry matter partitioning. *Crop Science*. (34): 1039-1043.
- Cirilo AG, Andrade FH. 1994b. Sowing date and maize productivity: I Kernel number determination. *Crop Science*. (34): 1044-1046.

- Cirilo AG, Andrade FH, Uhart SA, Gaggiotti M. 1992. Rendimiento y partición de materia seca en maíz bajo diferentes fechas de siembra. Actas V Congreso Nacional de Maíz, Pergamino li: 11-19.
- Cooper RL. 2003. A delayed flowering barrier to higher soybean yields. Field Crops Research. (82): 27-35.
- Dardanelli J, Collino D, Otegui ME, Sadras VO. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. In: Satorre EH, Benech RL, Slafer GA, de la Fuente EB, Miralles DJ, Otegui ME, Savin R. (eds.): Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. Buenos Aires Argentina. Facultad de Agronomía. U.B.A. 375-440.
- Dardanelli J, Suero E, Andrade FH, Andriani JM. 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans: II. Water use and water deficiency indicators. Agronomie. 11 (9): 747-756.
- Debórtoli GD, Marozzi DG, Méndez M, Currie H. 2005. Evaluación de los sistemas de riego por manto y platabanda en el cultivo de maíz (*Zea mays*, L.). Corrientes, Argentina. Universidad Nacional del Noreste. 4 p.
- Della Maggiora AI, Gardiol JM, Irigoyen AI, Suero EE, Serio L. 2008. Efecto de la disponibilidad de agua del suelo sobre la transpiración, eficiencia de transpiración y rendimiento de un cultivo de maíz (*Zea mays*). (En línea). In: Congresso Brasileiro de Meteorologia (11°. 2000, Rio de Janeiro). Anais. s.l., Ministerio de Agricultura, Pecuaria e Abastecimiento. 293-301. Consultado 27 de enero 2013. Disponible en: <http://www.cbmet.com/cbm-files/12-ceafad64456c6dd84ef35c6cbb553154.pdf>.
- Della Maggiora AI, Gardiol JM, Irigoyen AI. 2000. Requerimientos hídricos. En F. Andrade FH, Sadras VO (eds). Bases para el manejo del maíz, girasol y soja. Buenos Aires. Argentina. Editorial Médica Panamericana S.A. 155-171.
- Denmead OT, Shaw RH. 1960. The effects of soil moisture stress at different stages of growth on the development and yield of corn. Agronomy Journal. (52): 272–274.

- Desclaux D, Huynh T, Roumet P. 2000. Identification of soybean plant characteristics that indicate the timing of drought stress. *Crop Science*. (40): 716–722.
- Desclaux D, Roumet P. 1996. Impact of drought stress on the phenology of two soybean (*Glycine max* L. Merr) cultivars. *Field Crops Research*. (46): 61-70.
- Dogan E, Kirnak H, Copur O. 2007. Deficit irrigations during soybean reproductive stages and CROPGRO-soybean simulations under semi-arid climatic conditions. *Field Crops Research* (103): 154-159.
- Doorenbos J, Kassam AH. 1979. Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage paper No. 33. Rome, Italy. FAO. 193 p.
- Doorenbos J, Pruitt WO. 1977. Las necesidades de agua de los cultivos. Serie Riego y Drenaje 24. FAO.Hillel194 p.
- Eck HV, Mathers AC, Musick JT. 1987. Plant water stress at various growth stages and growth and yield of soybeans. *Field Crops Research*. (17): 1-16.
- Eck, H. V. 1986. Effects of water deficit on yield, yield components, and water use efficiency of irrigated corn. *Agronomy Journal*. (78): 1035-1040.
- Edmeades GO, Daynard TB. 1979. The relationship between final grain yield and photosynthesis at flowering in individual maize plants. *Canadian Journal Plants Science*. (59): 585-601.
- Egli DB, Leggett JE. 1976. Rate of dry matter accumulation in soybean seeds with varying source-sink ratios. *Agronomy Journal*. (68): 371-374.
- El-Hendawy SE, Abd El-Lattief EA, Ahmed AS, Schmidhalter U. 2008. Irrigation rate and plant density effects on yield and water use efficiency of drip-irrigated corn. *Agricultural Water Management*. (95): 836–844.
- Elmore RW, Eisenhauer DE, Specht JE, Williams JH. 1988. Soybean yield and yield component response to limited capacity sprinkler irrigation systems. *Production Agriculture*. 1 (3): 196-201.
- Ernst O, Mazzilli S, Siri-Prieto G. 2011. Manejo de la reserva de agua del suelo para situaciones de estrés hídrico. In: Simposio Nacional de Agricultura (2º, 2011, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Hemisferio Sur.

- Ernst O, Mazzilli S, Siri-Prieto G. 2009. Manejo de la reserva de agua del suelo para situaciones de estrés hídrico. In: Simposio Nacional de Agricultura de Secano (1°, 2009, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Hemisferio Sur. Facultad de Agronomía. IPNI Cono Sur.
- Ertek A, Kara B. 2013. Yield and quality of sweet corn under deficit irrigation. *Agricultural Water Management*. (129): 138-144.
- Evans LT. 1993. Crop Evolution, Adaptation and Yield. Cambridge. Cambridge University Press. 500 p.
- Fabeiro C, López Urrea R. 2005. Riego Deficitario Controlado. In: Martín de Santa Olalla F, López Fuster P, Calera A. (Eds), Agua y Agronomía. Mundi-Prensa, Madrid. 407-432.
- FAO-AQUASTAT. 2015. Uruguay. (En línea). Consultado 15 de noviembre 2015. Disponible en: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/ury/indexesp.stm
- FAO. 2009. Como alimentar al mundo en 2050. Foro de expertos de alto nivel. La agricultura mundial. (En línea). Consultado 10 de noviembre 2011. Disponible en: http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_SP/La_agricultura_mundial.pdf.
- Faraldo ML, Vergara GT, Casagrande GA, Arnaiz JP, Mirasson H, Ferrero C. 2011. Eficiencia en el uso del agua y radiación en maíz, girasol y soja, en la región oriental de la Pampa, Argentina. *Agronomía Tropical*. (61): 47-57.
- Farré I, Faci JM. 2009. Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a mediterranean environment. *Agricultural Water Management*. 96 (3): 383-394.
- Farré I. 1998. Respuesta del maíz al riego deficitario por inundación en distintas fases de su desarrollo. In: Farré I. (ed.) Respuesta del maíz (*Zea mays* L.) y sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) al riego deficitario: agronomía y modelización. Lérida, España. Universidad de Lérida. 67-114.
- Fehr WR, Caviness CE. 1977. Stages of soybean development. Iowa State University. Cooperative Extension Service. Special Report No. 80. 929-931.

- Fereres E, Soriano MA. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of experimental Botany*. 58 (2): 147-159.
- Fischbach PE, Somerhalder ER. 1974. Irrigation design requirement for corn. *Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers)*. 17 (1): 162-165.
- Fisher KS, Palmer FE. 1984. Tropical maize. *In*: Goldsworthy PR, Fisher NM. (Eds). *The physiology of tropical field crops*. Chichester, UK. John Wiley and Sons Ltd. 213-248.
- Flannery RL. 1983. 1983 soybean research yields top 118 bu/A. *Better Crops with Plant Food* 68 (winter). 6-7.
- Frederick JR, Bauer PJ, Camp C. 2001. Drought-stress effects on branch and mainstem seed yield and yield components of determinate soybean. *Crop Science*. (41): 759-763.
- Frugone M, Uhart SA, Andrade FH. 1992. Influencia de la competencia panoja espiga sobre la tolerancia a la densidad poblacional en maíz. *Actas XIX Reunión Argentina de Fisiología Vegetal*. Córdoba, Argentina. 67-68.
- Gallagher JN, Biscoe PV. 1978. Radiation absorption, growth and yield of cereals. *Journal Agriculture Science*. (91): 47-60.
- García FO. 2011. Balance de carbono y de nutrientes: buscando el equilibrio en la agricultura del Cono Sur. *En: II Simposio Nacional de Agricultura*. Paysandú, Uruguay. Facultad de Agronomía. IPNI Cono Sur. 135-147.
- García H, Ferrarotto M. 2009. Efecto del déficit hídrico sobre la acumulación de biomasa y nitrógeno en soya (*Glicine Max*) inoculada con *Bradirhizobium japonicum*. (En línea). Aragua, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. 21-27. Consultado 18 setiembre de 2014. Disponible en: http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_agro/article/view/130/108.
- García Petillo M. 2012. Conceptos básicos para el diseño y manejo del riego. *In: Seminario Internacional Riego en Cultivos y Pasturas (2º, 2012, Salto, Uruguay)*. Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Boscana. 25-32.

- García y García A, Persson T, Guerra L, Hoogenboom G. 2010. Response of soybean genotypes to different irrigation regimes in a humid region of the southeastern. *Agricultural Water Management*. (97): 981-987.
- Giménez L, García Petillo M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*. 15 (2): 100 -108.
- Gollan T, Schurr U, Schulze ED. 1992. Stomatal response to drying soil in relation to changes in the xylem sap composition of *Helianthus annuus*. I. The concentration of cations, anions, amino acids in, and pH of, the xylem sap. *Plant, Cell and Environment*. 15 (5): 551-559.
- Gordon WB, Raney RJ, Stone LR. 1995. Irrigation management practices for corn production in North central Kansas. *Journal of Soil and Water Conservation*. (50): 395–399.
- Grant RF, Jackson BS, Kiniry JR, Arkin GF. 1989. Water Deficit Timing Effects on Yield Components in Maize. *Agronomy Journal*. (81): 61-65.
- Hadley P, Roberts EH, Summerfield RJ. 1984. Effects of temperature and photoperiod on flowering in soya bean (*Glycine max* (L.) Merrill): a quantitative model. *Annals of Botany*. (53): 669–681.
- Hattendorf MJ, Redelfs MS, Amos B, Stone LR, Gwin RE. 1988. Comparative water use characteristics of six row crops. *Agronomy Journal*. 80 (1): 80-85.
- Heermann DF, Martin DL, Jackson RD, Stegman EC. 1990. Irrigation scheduling controls and techniques. In: Stewart. B.A.; Nielsen. D.R. eds. *Irrigation of agricultural crops*. Madison, Wisconsin. ASA (American Society Agronomy), CSSA (Crop Science Society of America), SSSA (Soil Science Society of America). 509- 535.
- Hergert GW, Klocke NL, Petersen JL, Nordquist PT, Clark RT, Wicks GA. 1993. Cropping Systems for Stretching Limited Irrigation Supplies. *Journal of Production Agriculture*. 6 (4): 461-527.
- Hill D, Guron Y. 1973. Relation between ET rate and maize yield. *Water Resources Research*. 9 (3): 743-748.

- Hillel D. 1998. Environmental Soil Physics. San Diego, California, USA, Academic Press. 771 pp.
- Howell TA, Evett SR, Tolk JA, Schneider AD. 2004. Evapotranspiration of full-, deficit-irrigated, and dryland cotton on the Northern Texas High Plains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. (130): 277–285.
- Hsiao TC. 1973. Plant responses to water stress. *Annual Review Plant Physiology*. (24): 519-570.
- Jacobs BJ, Pearson CJ. 1991. Potential yield of maize determined by rates of growth and development of ears. *Field Crops Research*. 27 (2): 281-298.
- Jama AO, Ottman MJ. 1993. Timing of the first irrigation in corn and water stress conditioning. *Agronomy Journal*. 85 (6): 1159-1164.
- James L. 1988. Principles of farm irrigation systems design. New York. John Wiley and Sons Publishers. 543 p.
- Kang S, Shi W, Zhang J. 2000. An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation. *Field Crops Research*. 67 (3): 207-214.
- Kantolic G, Giménez PI, de la Fuente EB. 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja. In: Satorre, E.H.; Benech Arnold, R.L.; Slafer, G.A.; de La Fuente, E.B.; Miralles, D.J.; Otegui, M.E.; Savin, R. eds. *Producción de granos; bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires, Argentina. Facultad de Agronomía. 167-186.
- Karam RM, Sfeir F, Mounzer O, Rouphael Y. 2005. Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. *Agricultural Water Management*. (75): 226-244.
- Kiniry JR, Ritchie JT. 1985. Shade sensitive interval of kernel number in maize. *Agronomy Journal*. (77): 711-715.
- Kirda C. 2002. Deficit irrigation scheduling based on plant growth stages showing water stress tolerance. *Deficit Irrigation Practice*. Water Reports 22. FAO. Rome. 3–10.
- Kirda C, Kanber R. 1999. Water, no longer a plentiful resource, should be used sparingly in irrigated agriculture. In: Kirda, C., Moutonnet, P., Hera, C.,

- Nielsen, D.R., (Eds.), Crop Yield Responses to Deficit Irrigation. Dordrecht. Kluwer Academic Publishers. 1–20.
- Klocke N, Currie R, Kisekka I, Stone L. 2014. Corn and Grain Sorghum Response to Limited Irrigation, Drought, and Hail. *Applied Engineering in Agriculture*. 30 (6): 915-924.
- Ko J, Piccinni G. 2009. Corn yield responses under crop evapotranspiration-based irrigation management. *Agricultural Water Management*. 96 (5): 799-808.
- Lamm FR, Rogers DH, Manges HL. 1994. Irrigation scheduling with planned soil water depletion. *Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers)*. (37): 1491-1497.
- Lawn RJ, Troedson RJ, Garside AL, Byth DE. 1984. Soybeans in saturated soil. A new way to higher yields. *World Soybean Research Conference Proceedings*. Ammes, Iowa. Iowa State University.
- Lichtenthaler HK. 2003. El estrés y la medida del estrés en las plantas. *In*: Reigosa MJ, Pedrol N, Sánchez A. (Eds.). *La ecofisiología vegetal. Una ciencia de síntesis*. Madrid, España. Thompson Editores. 59-113.
- López Fuster P. 2000. Los regadíos de la Mancha Oriental. Una quimera hecha realidad. Albacete, Instituto Técnico Agronómico Provincial y Caja de Castilla-La Mancha, Albacete, España.
- Magalhaes A, Da Silva W.J. 1987. Determinantes genéticos fisiológicos de la producción da milho: melhoramiento y producao do milho. San Paulo, Fundacao Cargill. 425 p.
- Maturano M. 2002. Estudio del uso del agua y del nitrógeno dentro del marco de una agricultura sostenible en las regiones maiceras Castellano-Manchega y Argentina. Tesis doctoral. Albacete, España, Universidad de Castilla-La Mancha. 194 p.
- Medrano H, Bota J, Cifre J, Flexas J, Ribas-Carbó M, Gulías J. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas* 43. Instituto Universitario de Geografía. Universidad de Alicante. 63-84.

- Medrano H, Flexas J. 2003. Respuesta de las plantas al estrés hídrico. In: Reigosa MJ, Pedrol N, Sánchez A. (eds.). La ecofisiología vegetal. Una ciencia de síntesis. Madrid, España. Thompson Editores. 253-285.
- Medrano H, Bota J, Abadía A, Sampol B, Escalona JM, Flexas J. 2002. Effects of drought on light-energy dissipation mechanisms in high-light-acclimated, field-grown grapevines. *Functional Plant Biology*. 29 (10): 1197-1207.
- Mendoza, A.E. 2013. Riego por goteo. (En línea). La libertad, El Salvador, CENTA, MAG. 90p. Consultado 2 setiembre de 2015. Disponible en: <http://www.centa.gob.sv/docs/guias/riego/Riego%20por%20Goteo%202013.pdf>.
- MGAP-DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca-Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2016. Serie de Encuestas 337. (En línea) Consultado 16 de noviembre 2016. Disponible en: http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/encuesta_agricola_invierno_2016.pdf.
- Molfino J, Califra A. 2001. Agua disponible en las tierras del Uruguay : Segunda aproximación. MGAP. Montevideo : MGAP. 12 p.
- Monteith JL. 1977. Climate and efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*. (281): 277-297.
- Muchow RC, Sinclair TR. 1991. Water deficit effects on maize yields modeled under current and “greenhouse” climates. *Agronomy Journal*. (83): 1052–1059.
- Musick JT, Dusek DA. 1980. Irrigated corn yield response to water. *Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers)*. 23 (1): 92-98.
- Nagore MJ, Echarte L, Andrade FH, Della Magiora A. 2013. Crop evapotranspiration in Argentinean maize hybrids released in different decades. *Field Crops Research*. (155): 23-29.
- NeSmith DS, Ritchie JT. 1992. Effects of soil water deficits during tassel emergence or development and yield components of maize (*Zea mays*). *Field Crops Research*. (28): 251-256.

- Neumaier N, Nepomuceno AL, Farias JRB. 2000. Estresses de ordem ecofisiológico. In: Bonato, ER. (ed.). Estresses em soja. Passo Fundo. EMBRAPA Trigo. 254 p.
- Neyshabouri MR, Hatfield JL. 1986. Soil water deficit effects on semi-determinate and indeterminate soybean growth and yield. *Field Crops Research* (15): 73-84.
- Ojeda-Bustamante W, Sifuentes-Ibarra E, Unland H. 2006. Programación integral del riego en maíz. *Agrociencia*. (40): 13-25.
- Otegui ME. 2009. Bases ecofisiológicas para el manejo del agua en cultivos para grano conducidos en secano. 2009. En: Hoffman, E., Ribeiro, A., Ernst, O. y García, F.O. (eds). *Primer Simposio Nacional de Agricultura de Secano*. Paysandú, Uruguay. Universidad de la República, Uruguay. 7-15.
- Otegui ME. 1997. Kernel set and flower synchrony within the ear of maize: II. Plant population effects. *Crop Science*. (37): 448-455.
- Otegui ME, Melón S. 1997. Kernel set and flower synchrony within the ear of maize: I. Plant population effects. *Crop Science*. (37): 441-447.
- Otegui ME, Andrade FH, Suero EE. 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Research*. 40 (2): 87-94.
- Otegui ME. 1992. Incidencia de una sequía alrededor de antesis en el cultivo de maíz. Consumo de agua, producción de materia seca y determinación del rendimiento. Tesis Magister Scientiae. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata. 93 p.
- Panda RK, Behera SK, Kashyap PS. 2004. Effective management of irrigation water for maize under stressed conditions. *Agricultural Water Management*. (66): 181-203.
- Pandey RK, Maranville JW, Chetima MM. 2000. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment: II. Shoot growth, nitrogen uptake and water extraction. *Agricultural Water Management*. 46 (1): 15-27.
- Pandey JP, Torrie J H. 1973. Path coefficient analysis of seed yield components in soybeans (*Glycine max* (L) Merrill). *Crop Science*. (13): 505-507.
- Payero JO, Tarkalson DD, Irmak S, Davison D, Petersen JL. 2009. Efecto del momento de una asignación de déficit de riego en la evapotranspiración de

- maíz, el rendimiento, la eficiencia del uso del agua y la materia seca. *Gestión Del Agua Agrícola*. 96 (10): 1387-1397.
- Payero JO, Tarkalson DD, Irmak S, Davison D, Petersen JL. 2008. Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*. (95): 895–908.
- Pereira LS, de Juan JA, Picornell MR, Tarjuelo JM. 2010. El riego y sus tecnologías. Albacete, España. CREA (Centro Regional de Estudios del Agua), Universidad de Castilla La Mancha. 296 p.
- Pereira LS, van den Broek B, Kabat P, Allen RG (eds). 1995. *Crop–Water Simulation Models in Practice*. Wageningen. Wageningen Press. 332 p.
- Pérez FV, Peña EP. 2013. Necesidades Hídricas de los granos. (En línea). Las Tunas, Cuba, Universidad de Las Tunas, Facultad de ciencias agrícolas. 62p. Consultado 8 de julio 2015. Disponible en: <http://www.eumed.net/libros-gratis/ciencia/2013/23/index.htm>.
- Piedrabuena L. 2010. ¿Es viable el riego extensivo en Uruguay? In: Seminario Internacional Potencial del Riego extensivo en Cultivos y Pasturas (1º, 2010, Paysandú, Uruguay) Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Boscana. 165–175.
- Puiatti JMP, Crespi RJ, Rivetti AR. 2002. Riego con equipos presurizados. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo*. 34 (2): 27-33.
- Purcell LC, Sinclair TR, McNew RW. 2003. Drought avoidance assessment for summer annual crops using long-term weather data. 2003. *Agronomy Journal*. 95: 1566-1576.
- Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agronomy Journal*. 101 (3): 438-447.
- Reddy VH, Daynard TB. 1983. Endosperm characteristics associated with rate of grain filling and kernel size in corn. *Maydica*. (28): 339-355.

- Rhoads FM, Bennett JM. 1990. Corn. In: Stewart BA, Nielsen DR. (eds.) Irrigation of agricultural crops. Madison, Wisconsin. ASA (American Society Agronomy), CSSA (Crop Science Society of America), SSSA (Soil Science Society of America). 569-596.
- Rivetti AR. 2007. Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto, Córdoba, Argentina. Revista de Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo. Tomo XXXIX. 29-39.
- Rodríguez H, Dardanelli J, De Battista J, Castellá M, Chaix X, Rochás M, Burgos G. s.f. Evaluación de respuesta en rendimiento al riego suplementario en soja sobre un suelo Vertisol. Entre Ríos, Argentina. INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) EEA (Estación Experimental Agropecuaria) Concepción del Uruguay. 1-5.
- Rosadi RA, Afandi S, Senge M, Ito K. 2005. Critical water content and water stress coefficient of soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) under deficit irrigation. Paddy Water Environment. (3): 219-223.
- Sadras VO, Calviño PA. 2001. Quantification of grain yield response to soil depth in soybean, maize, sunflower, and wheat. Agronomy Journal. (93): 577-583.
- Salinas AR, Zelener N, Cravitto RM, Bisaro V. 1996. Respuestas fisiológicas que caracterizan el comportamiento de diferentes cultivares de soja a la deficiencia hídrica en el suelo. EMBRAPA. Pesquisa Agropecuaria Brasileira. 31 (5): 331-339.
- Salisbury FB, Ross CW. 2000. Fisiología de las Plantas. Tomo 2. Bioquímica Vegetal. Madrid. España. Ed. Thomson-Paraninfo Learning. 212 p.
- Salvagiotti F. 2009. Rendimientos potenciales en maíz. Brechas de producción y prácticas de manejo para reducirlas. Para mejorar la producción. Enfoques y perspectivas. INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) EEA (Estación Experimental Agropecuaria) Oliveros. (41): 61-66.
- Saseendran SA, Ma L, Malone R, Heilman P, Ahuja LR, Kanwar RS, Karlen DL, Hoogenboom G. 2007. Simulating management effects on crop production, tile drainage, and water quality using RZWQM-DSSAT. Geoderma. (140): 297-309.

- Sawchik J. 2012. Necesidades de Riego en Cultivos y Pasturas. In: Seminario Internacional Riego en Cultivos y Pasturas (2°, 2012, Salto, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Imprenta Boscana. 55-68.
- Sawchik J, Ceretta S. 2005. Consumo de agua por soja de distintos grupos de madurez en diferentes ambientes de producción. Montevideo, INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria). 41-51.
- Scheierling SM, Cardon GE, Young RA. 1997. Impact of Irrigation Timing on Simulated Water-Crop Production Functions. *Irrigation Science* 18 (1): 23-31.
- Setiyono TD, Weiss A, Specht J, Bastidas AM, Cassman KG, Dobermann A. 2007. Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high-yield conditions. *Field Crops Research*. (100): 257 -271.
- Shaw RH. 1988. Climate Requirement. In: Sprague CF, and Dudley JW (eds) Corn and Corn Improvement. Madison, Wisconsin. ASA (American Society Agronomy), CSSA (Crop Science Society of America), SSSA (Soil Science Society of America). 609-638.
- Shaw RH, Newman JE. 1987. Weather stress in the corn crop. In: National corn Handbook. Project leader: Nielsen R. Purdue University. West Lafayette. Indiana. USA. 6 p.
- Sincik M, Candogan B N, Demirtas C, Büyükacangaz H, Yazgan S, Göksoy A T. 2008. Deficit irrigation of soybean [*Glycine max* (L) Merr.] in a sub-humid climate. *Journal of Agronomy and Crop. Sciences*. (194): 200-205.
- Sinclair TR, Bennett JM, Muchow RC. 1990. Relative sensitivity of grain yield and biomass accumulation to drought in yield-grown maize. *Crop Science*. (30): 690-693.
- Singh BR, Singh DP. 1995. Agronomic and physiological responses of sorghum, maize and pearl millet to irrigation. *Field Crops Research*. (42): 57-67.
- Sionit K, Kramer PJ. 1977. Effect of water stress during different stages of growth of soybean. *Agronomy Journal*. (69): 274–278.
- Slafer GA, Calderini DF, Miralles DJ. 1996. Yield components and compensation in wheat: opportunities for further increasing yield potential. In: Reynolds MP,

- Rajaram S, Mc Nab A. (eds.), Increasing Yield Potential in wheat: Breaking the barriers: CIMMYT. Mexico. 101-133.
- Spaeth SC, Randall HC, Sinclair TR, Vendeland JS. 1984. Stability of soybean harvest index. *Agronomy Journal*. 76 (3): 482-486.
- Specht JD, Hume JD, Kumudini SV. 1999. Soybean yield potential—a genetic and physiological perspective. *Crop Science*. (39): 1560–1570.
- Steduto P, Hsiao T, Fereres E, Raes D. 2012. Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Estudio FAO Riego y Drenaje 66. Roma Italia. 510 p.
- Steduto P, Raes D, Hsiao TS. 2009. Concepts and applications of AquaCrop: the FAO crop water productivity model. *Crop Modeling and Decisión Support*, 175–191. http://doi.org/10.1007/978-3-642-01132-0_19
- Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*. (25):189–207.
- Steduto P, Albrizio R. 2005. Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea. II. Water use efficiency and comparison with radiation use efficiency. *Agricultural and Forest Meteorology*. (130): 269–281.
- Steele DD, Stegman EC, Gregor BL. 1994. Field comparison of irrigation scheduling methods for corn. *Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers)*. 37 (4): 1197-1203.
- Stegman EC. 1982. Corn grain yield as influenced by timing of evapotranspiration. *Irrigation Science*. (3): 75-87.
- Sweeney DW, Long JH, Kirkham MB. 2003. A single irrigation to improve early maturing soybean yield and quality. *Soil Science Society of America Journal*. (67): 235-240.
- Thomas AL, Costa JA. 1994. Influencia do déficit hídrico sobre o desenvolvimento e rendimento da soja. EMBRAPA. *Revista Agropecuaria Brasileira (PAB)*. 29 (9): 1389-1396.
- Tollenaar M. 1977. Sink-source relationship during reproductive development in maize. A review. *Maydica*. (22): 49-75.

- Tolk JA, Howell TA. 2003. Water use efficiencies of grain sorghum grown in three USA southern Great Plains soils. *Agricultural Water Management*. (59): 97-111.
- Tolk JA, Howell TA, Evett SR. 1998. Evapotranspiration and yield of corn grown on three high Plains soils. *Agronomy Journal*. (90): 447-454.
- Traore SB, Carlson RE, Pilcher CD, Rice ME. 2000. Bt and non-Bt maize growth and development as affected by temperature and drought stress. *Agronomy Journal*. 92 (5): 1027-1035.
- Trooien TP, Buschman LL, Sloderbeck P, Dhuyvetter KC, Spurgeon WE. 1999. Water use efficiency of different maturity corn hybrids and grain sorghum in the central Great Plains. *Journal of Production Agriculture*. 12 (3): 377–382.
- Trout T, Bausch W. 2012. Water production functions for Central Plains Crops. (En línea). *Proceedings of the 24th Annual Central Plains Irrigation Conference*, Colby, Kansas, February 21-22, 2012. Consultado 23 de agosto 2015. Disponible en: <https://www.ksre.k-state.edu/irrigate/oow/p12/Trout12.pdf>.
- Uhart SA, Andrade FH. 1995. Nitrogen deficiency in maize: I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning and kernel set. *Crop Science*. (35): 1376-1383.
- Uhart SA, Andrade FH. 1991. Source-sink relationships in maize grown in a cool temperate area. *Agronomie*. (11): 863-875.
- Uruguay Siglo XXI. 2015. Informe de comercio exterior. Informes mensuales. Exportaciones e importaciones de Uruguay Julio 2015. (En línea). Consultado 7 julio de 2016. Disponible en: <http://www.uruguayxxi.gub.uy/informacion/wp-content/uploads/sites/9/2015/08/Informe-de-comercio-exterior-Julio-2015-Uy-XXI.pdf>.
- Valentinuz OR, Uhart SA, Vega CR, Andrade FH. 1996. Número de granos en maíz, girasol y soja y radiación interceptada por planta. *Actas del VII Congreso Argentino de Meteorología y VII Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología*. Buenos Aires. Argentina. 39-40.

- Vallone P, Gudjel V, Pochettino A, Segura L. 2003. Potencial de rendimiento de maíz sin restricciones hídricas ni nutricionales. Córdoba, Argentina. INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) – EEA (Estación Experimental Agropecuaria) Marcos Juárez. Información para extensión. (80): 35-37.
- Vaux HJ Jr., Pruitt WO. 1983. Crop-water production functions. *In*: Hillel, D. eds. *Advances in irrigation*. New York. New York Academic Press. 61-97.
- Vega CRC, Valentinuz OR, Uhart SA, Andrade FH. 1997. Número de granos por planta en soja, girasol y maíz en función de la tasa de crecimiento por planta durante el periodo crítico de determinación del rendimiento. VI Congreso Nacional de Maíz. Noviembre de 1997. Pergamino, Buenos Aires. Argentina. Tomo II. 27-34.
- Vila HF. 2011. Regulación de la hidratación y la turgencia foliares por mecanismos evitadores del estrés, y resistencia a déficit hídrico en vid Modelo vs. Experimentos. Tesis Doctor en Biología mención fisiología Vegetal. Mendoza, Argentina. Universidad Nacional de Cuyo. 204 p.
- Vilche MS, Costanzo M. 2011. Consumo hídrico del cultivo de soja (*Glicine max*, Merrill) en Zavalla, Santa Fé. (En línea). *Revista Agromensajes*. 31 (6): s.p. Consultado 14 noviembre 2014. Disponible en:
<http://www.fcagr.unr.edu.ar/Extension/Agromensajes/31/2AM31.htm>
- Wallace JS. 2000. Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. (82):105–119.
- Westgate ME, Boyer JS. 1985. Carbohydrate Reserves and Reproductive Development at Low Leaf Water Potentials in Maize. *Crop Science*. (25): 762-769.
- WWAP. (World Water Assessment Programme). 2009. *Water in changing world*. The United Nations World Water Development Report 3. UNESCO.
- Zampedri SM, Currie HM. 2000. Impacto del riego complementario en los rendimientos del cultivo de la soja en el centro sur de la Provincia de Corrientes. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas* 2000. Universidad Nacional del Nordeste. Argentina.

Zwart SJ, Bastiaanssen WMG. 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize, *Agricultural Water Management*. (69): 115–133.

10. ANEXOS

Cuadro 1A. Precipitaciones totales (mm), efectivas (mm), porcentaje de efectividad y número de eventos de precipitaciones en maíz, en tratamientos: bienestar hídrico (T1), deficiencias hídricas en el periodo crítico (PC) (T2), deficiencias hídricas en el llenado de grano (T3), deficiencias hídricas en etapa vegetativa y PC (T4) y seco (T5), en las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012.

Temporada/ Tratamiento	Precipitaciones totales (mm)	Precipitaciones efectivas (mm)	Porcentaje de efectividad	Número de eventos de precipitaciones
2009				
T1	1549	373	24	38
T2	1381	410	30	30
T5	1549	517	33	38
2010				
T1	442	207	47	15
T2	432	243	56	13
T3	365	261	72	14
T4	412	238	58	12
T5	441	354	80	15
2011				
T1	698	269	39	20
T2	698	309	44	20
T3	480	279	58	16
T4	552	189	34	18
T5	698	328	47	20
2012				
T1	671	278	41	23
T2	652	281	43	21
T3	633	256	40	21
T4	529	261	49	18
T5	671	415	62	23

Cuadro 2 A Radiación solar incidente (MJ m²) en los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero y totales de las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012.

Temporada/mes	2009	2010	2011	2012	Media mensual
Noviembre	581	788	781	739	722
Diciembre	701	814	837	747	775
Enero	809	769	859	819	814
Febrero	499	566	549	559	543
Marzo	615	625	570	570	595
Total	3205	3562	3596	3434	3449

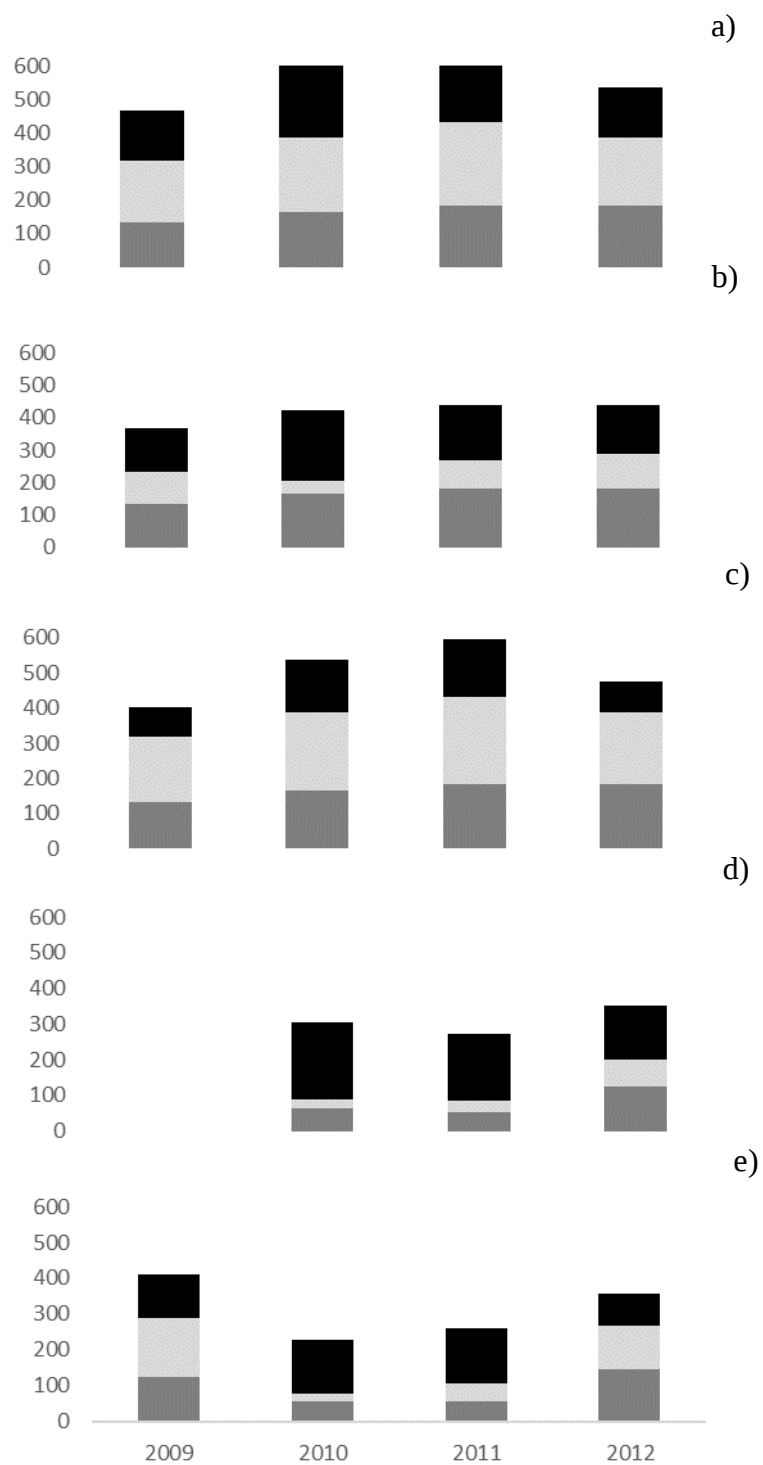


Figura 1A. Consumo de agua (mm) de maíz en las etapas de desarrollo: vegetativa (fracción gris oscuro de las columnas), entorno de floración (fracción gris claro de las columnas) y llenado de grano (fracción negra de las columnas), para los tratamientos: bienestar hídrico (a), deficiencias en entorno de la floración (b), deficiencias en llenado de grano (c), deficiencias en etapa vegetativa y periodo crítico (d) y deficiencias en llenado de grano (e); para las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012.

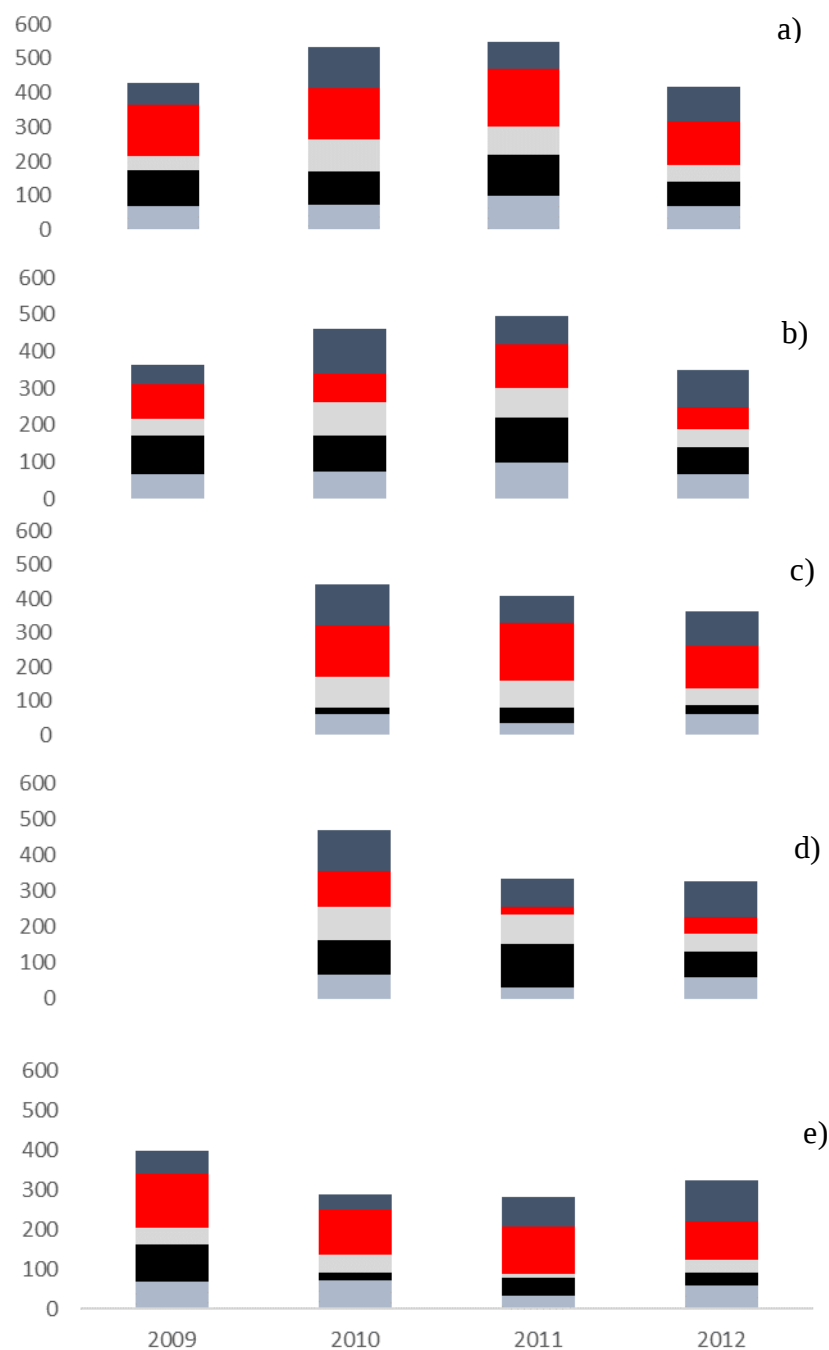


Figura 2 A. Consumo de agua (mm) en soja en las etapas: vegetativa (fracción celeste de columnas), floración (R1-R2, fracción negra de columna), comienzo de fructificación (R3, fracción gris de columna), llenado de grano (R4-R6, fracción roja de la columna) y maduración (R7-R8, fracción azul de la columna), para los tratamientos: bienestar hídrico, T1, (a); deficiencias hídricas en llenado de grano, T2, (b); deficiencias hídricas en etapa vegetativa y floración, T3, (c); deficiencias hídricas en etapas vegetativa y llenado de grano, T4, (d) y secano, T5, (e); en las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012. A

Cuadro 3 A. Precipitaciones totales (mm), efectivas (mm), porcentaje de efectividad y número de eventos de precipitaciones, en soja en los tratamientos con: bienestar hídrico (T1), deficiencias hídricas en el periodo crítico (PC, T2), deficiencias hídricas en etapa vegetativa y floración (T3), deficiencias hídricas en etapa vegetativa y PC (T4) y seco (T5), en las temporadas 2009, 2010, 2011 y 2012.

Temporada/ Tratamiento	Precipitaciones totales (mm)	Precipitaciones efectivas (mm)	Porcentaje efectividad	Número de eventos
2009				
T1	1331	445	33	27
T2	646	389	60	19
T5	1331	470	35	27
2010				
T1	458	195	43	18
T2	275	254	92	15
T3	447	171	38	15
T4	375	342	91	16
T5	458	343	75	18
2011				
T1	674	251	37	19
T2	498	308	62	15
T3	632	258	41	18
T4	324	215	66	13
T5	674	373	55	19
2012				
T1	552	243	44	18
T2	429	266	62	13
T3	513	221	43	18
T4	444	256	58	13
T5	552	399	72	18