

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EFECTO DE DIFERENTES DISPONIBILIDADES HIDRICAS SOBRE EL
RENDIMIENTO DE SOJA

por

Juan Pablo GRASSO GONZALEZ
Juan Agustín MONTERO PINCZAK

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

MONTEVIDEO
URUGUAY
2011

Tesis aprobada por:

Director: -----
Ing. Agr. Luis Giménez

Ing. Agr. Sebastián Mazzilli

Ing. Agr. Mario García Petillo

Fecha: 14 de noviembre de 2011

Autor: -----
Juan Pablo Grasso González

Juan Agustín Montero Pinczak

AGRADECIMIENTOS

A nuestro director de tesis Ing. Agr. MSc. Luis Giménez por permitirnos desarrollar este trabajo, por su constante apoyo durante el mismo y a la Lic. Sully Toledo y todo el personal de biblioteca por su colaboración durante la realización del presente trabajo.

A Richard Arévalos, Matías y Gerónimo Giménez por su colaboración en el trabajo de campo y a los funcionarios del laboratorio de la EEMAC.

Especialmente a nuestras familias por su apoyo constante durante todos los años de la carrera, que sin ellas esto no hubiera sido posible.

A todos aquellos compañeros y amigos que conocimos a lo largo de la carrera, quienes quedan en nuestro recuerdo, junto a todas las experiencias vividas. A aquellos que compartieron con nosotros la convivencia en la EEMAC.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	2
2.1. <u>CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA SOJA EN URUGUAY</u>	2
2.1.1. <u>Evolución del área</u>	2
2.1.2. <u>Evolución de los rendimientos</u>	3
2.1.3. <u>Evolución de las exportaciones</u>	3
2.1.4. <u>Localización geográfica</u>	3
2.2. <u>AMBIENTES DE PRODUCCIÓN</u>	4
2.2.1. <u>Características principales de los suelos</u>	4
2.2.2. <u>Capacidad de almacenaje de agua disponible (CAAD)</u>	4
2.2.3. <u>Temperatura del aire</u>	5
2.2.4. <u>Heliofanía real</u>	5
2.2.5. <u>Precipitaciones</u>	5
2.2.6. <u>Principales limitantes en la determinación del rendimiento</u>	6
2.3. <u>CARACTERÍSTICAS ECOCOFISIOLÓGICAS</u>	8
2.3.1. <u>Principales estados de desarrollo de soja</u>	9
2.3.1.1. <u>Estados vegetativos</u>	9
2.3.1.2. <u>Estados reproductivos</u>	10
2.3.2. <u>Factores que afectan el crecimiento y desarrollo</u>	10
2.3.2.1. <u>Disponibilidad hídrica</u>	11
2.3.2.2. <u>Temperatura</u>	12
2.3.2.3. <u>Fotoperíodo</u>	12
2.4. <u>REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DE SOJA</u>	13
2.4.1. <u>Factores meteorológicos que afectan evapotranspiración</u>	14
2.4.2. <u>Agua disponible</u>	14
2.4.3. <u>Consumo de agua</u>	16
2.4.4. <u>Profundidad radical y absorción de agua</u>	18
2.4.5. <u>Manejo del agua del suelo</u>	19
2.5. <u>INFLUENCIA DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA SOBRE EL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE SOJA</u>	20
2.5.1. <u>Efectos sobre la producción biomasa</u>	20
2.5.2. <u>Área foliar e intercepción de radiación</u>	21

2.5.3. <u>Eficiencia de conversión</u>	21
2.5.4. <u>Efecto sobre la tasa de crecimiento del cultivo (TCC)</u>	22
2.5.5. <u>Respuesta de la soja al estrés hídrico y rendimiento en grano</u>	23
2.5.5.1. Efecto del estrés durante floración.....	24
2.5.5.2. Efecto del estrés durante la formación de vainas.....	24
2.5.5.3. Efecto del estrés durante llenado de granos.....	25
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	27
3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO.....	27
3.1.1. <u>Manejo experimental</u>	27
3.1.2. <u>Tratamientos</u>	28
3.1.3. <u>Diseño experimental</u>	29
3.2. DETERMINACIONES.....	30
3.2.1. <u>Determinaciones durante el ciclo del cultivo</u>	30
3.2.2. <u>Determinaciones a cosecha</u>	30
3.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	31
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	32
4.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS EN EL PERÍODO DEL CULTIVO.....	32
4.1.1. <u>Precipitaciones</u>	32
4.1.2. <u>Radiación solar incidente</u>	34
4.2. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO.....	35
4.2.1. <u>Evolución del agua disponible en el suelo</u>	35
4.2.2. <u>Parámetros de crecimiento</u>	37
4.2.2.1. Evolución de la MS durante el período crítico.....	37
4.2.2.2. Efecto de la disponibilidad hídrica sobre la TCC durante R3-R5.....	39
4.2.3. Efecto de la disponibilidad hídrica sobre el rendimiento.....	40
4.2.3.1. Relación entre rendimiento y sus componentes.....	42
4.2.3.2. Efecto de la disponibilidad hídrica sobre los componentes del rendimiento.....	43
4.2.4. <u>Evapotranspiración del cultivo y eficiencia en el uso del agua en el T1</u>	44
5. <u>CONCLUSIONES</u>	46
6. <u>RESUMEN</u>	47
7. <u>SUMMARY</u>	48
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	49

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Características hidrológicas del suelo.....	27
2. Calendario de eventos fonológicos.....	28
3. Evolución de la biomasa entre R5 y R6.....	39
4. Componentes del rendimiento para las tres disponibilidades hídricas.....	42
 Figura No.	
1. Precipitaciones durante 2009-2010 y valores promedio de la serie histórica 1961 hasta 2009.....	32
2. Precipitaciones durante el ciclo del cultivo y ubicación de los principales eventos fenológicos.....	33
3. Radiación solar para la serie histórica 1969-2009 y en el verano 2009-2010.....	34
4. Evolución del agua disponible (AD) en el T1.....	35
5. Evolución del agua disponible (AD) en el T2.....	36
6. Evolución del agua disponible (AD) en el T3.....	37
7. Materia seca acumulada en tres momentos del ciclo para los tratamientos evaluados	38
8. Tasa de crecimiento del cultivo durante R3-R5 en los tres tratamientos.....	40
9. Rendimiento en grano (Kg/ha^{-1}), en los diferentes tratamientos.....	41
10. Rendimiento en función del número de granos. m^{-2} (a) y el peso de 1000 granos (b).....	42
11. Evapotranspiración (mm/día) del cultivo en el T1.....	44

1. INTRODUCCIÓN

En Uruguay y en la región a partir del año 2000, han ocurrido importantes cambios en el sector agrícola. La expansión del área destinada al cultivo de soja ha sido el factor principal de estos cambios, impulsada por una creciente demanda externa, precios elevados y factores internos como la adopción masiva de la siembra directa y la utilización de variedades genéticamente modificadas que han permitido un crecimiento muy importante de la superficie de siembra.

El área destinada a la soja ha tenido un crecimiento sostenido desde principios de la década. En 2009/10 se sembraron 847 mil ha de cultivo y se obtuvo una producción de 1.790.000 toneladas de grano (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2010). El crecimiento en la superficie originó un aumento significativo en la producción, no obstante los rendimientos presentan un estancamiento y una elevada variabilidad entre años, debido principalmente a la insuficiente y variable disponibilidad hídrica que sufren los cultivos (García, 2009).

Las deficiencias hídricas provocan disminuciones en los rendimientos, siendo la distribución irregular de las precipitaciones (PP) durante la primavera y el verano la principal responsable de la variabilidad de estos en nuestras condiciones de producción. Asimismo la baja capacidad de almacenamiento de agua de la mayoría de los suelos en los que se desarrolla la agricultura provoca que la principal limitante ambiental para los cultivos estivales sea la disponibilidad hídrica (Sawchik y Ceretta, 2005).

El riego suplementario constituye una alternativa para incrementar los rendimientos y disminuir su variabilidad, sin embargo para mejorar la adopción de esta tecnología es preciso generar mayor información de manera de lograr superar los costos e inversiones que implica y además realizar un uso eficiente del agua de riego.

Entre las razones encontradas para que exista una baja adopción de riego suplementario a nivel comercial en soja, se destacan la insuficiente información sobre los rendimientos potenciales y las pérdidas físicas y económicas ocasionadas por las deficiencias hídricas.

A nivel nacional y regional la investigación en riego suplementario en soja es escasa ya que la mayor parte de la superficie del cultivo se desarrolla en condiciones de secano.

El objetivo general de este trabajo es cuantificar el rendimiento sin deficiencias hídricas y medir el efecto de las deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo del cultivo de soja.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La soja *Glycine max* es de origen asiático y procede de otra especie silvestre (*Glycine ussuriensis*), su centro de origen es el extremo oriente (China, Japón). Las primeras semillas plantadas en Europa provinieron de China, la primera siembra se realizó en 1740. Algunos años más tarde, en 1765 se introdujo en América del Norte (Georgia, EEUU) desde China. Sin embargo, no fue hasta la década del 40 del siglo XX donde se produjo la gran expansión del cultivo en ese país, liderando la producción mundial de soja a partir de 1954 hasta la actualidad. En América del sur y específicamente en Brasil fue introducida en 1882, pero su difusión se inició a principios del siglo XX y la producción comercial comenzó también en la década de 40 (Shurtleff y Aoyagi, 2009).

2.1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA SOJA EN URUGUAY

En Uruguay de acuerdo a lo que indican las series históricas de DIEA-MGAP la soja fue cultivada por primera vez en el año 1964 (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2010). Aunque según Boerger, citado por Shurtleff y Aoyagi (2009), fue introducida en Uruguay en 1911.

2.1.1. Evolución del área

El área sembrada no fue significativa hasta fines de la década del 70, donde por un acuerdo comercial con Taiwán se logró la obtención de un precio diferencial por el cual el área sembrada alcanzó casi 51 mil has (Blum et al., 2008). Terminado dicho acuerdo disminuye el área sembrada hasta el año 1988/89 donde nuevamente se alcanzan 55 mil has (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2010). Durante la década del 90 el área de soja disminuye ya que la agricultura uruguaya atraviesa una crisis y la superficie sembrada oscila en torno a las 10 mil ha manteniéndose esta tendencia hasta el año 2000.

A partir del año 2000 la soja ha experimentado una gran expansión pasando de ocupar 12 mil has hasta alcanzar 847 mil has en la zafra 2009/2010, incrementando el área de la zafra anterior en un 40% y concentrando el 84% de la superficie sembrada de cultivos de verano y el 49% de la agricultura de secano a nivel nacional (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2010).

Este abrupto crecimiento del área de soja puede ser explicado por diversos factores, como la adopción de nuevas tecnologías tales como la siembra directa, el uso de Organismos Genéticamente Modificados, la aparición de un nuevo tipo de agricultor fundamentalmente extranjeros, las nuevas formas de financiamiento, el fuerte

incremento en el precio y una elevada demanda de mercados internacionales por aumento de la población mundial.

2.1.2. Evolución de los rendimientos

La producción nacional de soja se ha incrementado en los últimos años como consecuencia de un aumento en el área sembrada, pasando de casi 27 mil toneladas en la zafra 2000/01 hasta alcanzar 1.790 mil toneladas en la zafra 2009/10. El rendimiento promedio para dicho período fue de $1.990 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2010).

A pesar de este aumento en la producción si se analiza la producción en los diferentes años se observa una gran variabilidad en los rendimientos pese a los cambios en la tecnología asociado al cultivo de soja como lo es el uso de cultivares resistentes al glifosato, control de plagas, siembra directa, etc.

2.1.3. Evolución de las exportaciones

El volumen producido en la última cosecha 2009/10 registró un récord en el país aumentando 77% como consecuencia de un aumento entorno al 49% de la superficie cultivada (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2010).

El Uruguay aprovechó una coyuntura de buen pasar internacional positiva donde los precios aumentaron, donde se logro alcanzar 1,97 millones de toneladas exportadas es decir un 80% mayor al período anterior 2008/09. Los principales destinos de las exportaciones de soja fueron China, con el 73% del total exportado; en segundo lugar Holanda y Alemania, con 12% y Portugal completa con un 2%. Los demás destinos fueron Túnez, Rusia y Turquía (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2010).

2.1.4. Localización geográfica

En la década del 50, la agricultura uruguaya sufrió una reubicación dejando la zona centro sur y desplazándose hacia el litoral oeste donde se encuentra localizada mayoritariamente en la actualidad. Este cambio posibilitó el crecimiento de la agricultura basado en la aptitud natural que poseen estos suelos como fertilidad natural alta y condiciones físicas adecuadas, (De los Campos y Pereira, citados por Blum et al., 2008). Además de la cercanía al puerto de Nueva Palmira son algunos de los factores que caracterizan a la actual zona agrícola tradicional.

En la actualidad si bien se ha expandido el área a zonas no tradicionalmente agrícolas, el mayor crecimiento se produce en la zona tradicional la cuál concentra más del 85% del área de cultivos de verano. Esta zona comprende los departamentos de Soriano, Río Negro, Paysandú, Colonia, Flores Durazno, San José y Florida. La zona no

tradicional está integrada por los departamentos de Tacuarembó, Cerro Largo, Rivera, Rocha y Treinta y Tres, entre otros (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2009).

2.2. AMBIENTES DE PRODUCCION

2.2.1. Características principales de los suelos

Según Durán et al. (1999), entre los rasgos más significativos de los suelos del Uruguay, se destaca el color oscuro en casi todo el perfil: negro, pardo muy oscuro o pardo grisáceo muy oscuro. Un alto contenido de materia orgánica, en general presentan una saturación de bases mayor al 50 por ciento y un pH mayor de 5,5 en todo el perfil, un último rasgo común a los suelos más extendidos en el país es la dominancia de arcillas de tipo 2:1 con carga permanente, particularmente mica (illita) y esmectitas. Estas características, casi siempre presentes, dan origen a suelos con un horizonte B argilúvico, de alto contenido de arcilla y poco permeable (Argiudoles Típicos y Vérticos principalmente).

2.2.2. Capacidad de almacenaje de agua disponible (CAAD)

El contenido total de agua del suelo no está disponible o utilizable totalmente para las plantas. Se define el agua disponible (AD) como la diferencia entre el contenido de agua de un suelo a capacidad de campo (CC) y el contenido de agua en el coeficiente de marchitez permanente (CMP) (García Préchac et al., s.f.).

La CC se define como el contenido de agua de un suelo inicialmente saturado luego de que el agua gravitacional ha drenado, el espacio de los macro poros esta ocupado por aire y el de los micro poros por agua, donde parte de la cual podrá ser utilizada por las plantas (García Préchac et al., s.f.).

El CMP sería el límite inferior de disponibilidad de agua en el suelo, luego de que las pérdidas por transpiración de las plantas y evaporación directa del suelo reducen tanto el agua en el suelo que la velocidad de suministro del suelos a las plantas es tan lenta que estas permanecen marchitas noche y día (García Préchac et al., s.f.).

Molfino y Califra (2001), concluyen que casi un 30% de la superficie de nuestro territorio posee tierras con muy baja (menor a 40 mm) y baja (entre 40 y 80 mm) CAAD. Es importante destacar que la CAAD de la mayor parte de los suelos agrícolas del litoral oeste y de otras zonas agrícolas varía entre 80 y 160 mm. Esto representa aproximadamente 1/4 o 1/3 respectivamente del consumo de cultivos de soja de primera con rendimientos potenciales (Sawchik y Cereta, 2005).

2.2.3. Temperatura del aire

La temperatura media anual sobre Uruguay es de 17,7 °C, variando desde 19,8 °C en la zona noreste, hasta 16,6 °C en la costa sur del país. Las temperaturas medias más altas se presentan en los meses de enero y febrero y las más bajas en junio y julio, de acuerdo a la región. Los promedios nacionales de las temperaturas extremas anuales del aire se caracterizan por una temperatura máxima media de 22,6 °C y una mínima media de 12,9 °C (Castaño et al., 2010).

Al analizar las temperaturas máximas medias se infiere que una vez cada 10 años los valores de la temperatura máxima media mensual en enero está comprendido entre 28°C y 32°C y una vez cada 30 años los valores están entre 30°C y 34°C, siendo la región más caliente la zona noroeste Artigas, Salto y Paysandú (Castaño et al., 2010).

En el período 2001-2010 la temperatura media del verano para el país tuvo un valor de 23,4°C marcando un incremento de 0,3°C respecto al período estadístico 1961-1990 (URUGUAY. MDN. DNM, 2010).

2.2.4. Heliofanía real

La heliofanía real (insolación) media sobre el país presenta una variación espacial mínima con una tendencia creciente en dirección Sureste-Noroeste. Los valores medios de horas de insolación media diaria sobre el país se sitúan en 7 horas con los menores valores situados al sureste (Rocha) y los máximos al noroeste (Salto y Artigas) (Castaño et al., 2010).

En cuanto a la distribución espacial se observa una relativa homogeneidad en la región, con una tendencia en promedios anuales, a mayores valores en el noroeste, producto de una menor nubosidad y humedad relativa en promedio sumado a una mayor insolación astronómica por su menor latitud (Castaño et al., 2010).

La radiación media durante el verano para el período 1979-1984 fue de 5 millones de cal.m⁻².día⁻¹. En el centro del país recibe el valor más alto. De los meses del verano, en diciembre se reciben como promedio 6 millones de cal.m⁻².día⁻¹, contrastando con febrero que recibe casi 5 millones de cal.m⁻².día⁻¹ (URUGUAY. MDN. DNM, 2010).

2.2.5. Precipitaciones

El régimen de precipitaciones (PP) del país, se clasifica como isohigro y presenta volúmenes anuales promedio de 1.000 mm en el Sur a 1.400 mm en el Norte del territorio, con una distribución uniforme en el año. Además, como característica principal de las PP se destaca una elevada variabilidad interanual (Genta y Texeira,

2001). Esto provoca frecuentemente deficiencias hídricas temporarias en los meses de mayor demanda atmosférica que ocurren normalmente en primavera y verano.

Entre los meses de noviembre y febrero se presentan en general deficiencias hídricas, durante dicho período las PP promedio no son suficientes para cumplir las necesidades de los cultivos de verano, ocurriendo frecuentes deficiencias hídricas. Por otra parte, ocurre un período de excesos hídricos durante invierno y comienzo de primavera, período clave ya que de él depende la acumulación de agua en el perfil para los cultivos de verano (Corsi, 1982).

Las diferencias más notorias entre las regiones Norte, Centro Este y Sur se da en el total anual de PP, donde se observa un incremento de Sur a Norte (Terra y Pisciotano, 1994).

Considerando los volúmenes acumulados de las PP a través del año, no existen estaciones secas ni lluviosas bien definidas, registrándose acumulados medios mensuales entre 60 mm.mes (litoral oeste en invierno) y 140 mm.mes (noroeste en abril y octubre). Esta variabilidad se constata en todos los meses del año aproximadamente en la misma magnitud, registrándose en los años extremos valores mínimos inferiores a 20 mm.mes y máximos superiores, en todos los meses, a los 250 mm.mes (URUGUAY. MDN. DNM, 2010).

Las PP medias en verano es del orden de los 361 mm estando comprendida entre 453 mm en la Estación Meteorológica de Artigas y 245 mm en la Estación Meteorológica de Punta del Este en el Departamento de Maldonado.

En el período 2001-2010 las PP acumuladas medias del verano para el país fueron de 380 mm. En términos de promedio nacional el verano más lluvioso fue el de 2009/10 con 662 mm y el menos lluvioso fue el de 2006/07 con 122 mm (URUGUAY. MDN. DNM, 2010).

Para el período 1919-2008 la amplitud de la variabilidad interanual es la dominante con amplitudes de 500 mm y más. Además esta tendencia es particularmente intensa en las últimas décadas (Baethgen y Terra, 2010).

2.2.6. Principales limitantes en la determinación del rendimiento

En los cultivos agrícolas se presentan un conjunto de limitantes para la obtención de los rendimientos potenciales, pero las deficiencias hídricas en el Uruguay se destacan como uno de los principales factores de pérdidas de rendimiento en cultivos de verano (Giménez y García, 2009).

De acuerdo con Baigorri (1997), en el Uruguay se pueden sembrar sin limitantes de temperatura, radiación solar y fotoperíodo, los grupos de madurez (GM) III al VIII. Tomando como fechas óptimas de siembra las que se desarrollan durante el mes de noviembre. Los GM más precoces (III y IV) se deben ubicar al sur y los más tardíos (VII y VIII) en el norte del territorio.

En el Uruguay, el cultivo de soja presenta variaciones relativamente altas en los rendimientos, tanto a nivel nacional, como en regiones contrastantes: litoral sur, noreste y este (Díaz, citado por Mandl, 2000). Aún mayor es la variabilidad de este cultivo entre años, explicada principalmente por la variación de las PP tanto en cantidad como en su distribución. La ocurrencia de períodos de déficit hídrico más o menos prolongados constituye una causa fundamental que explica la variabilidad interanual en los rendimientos de los cultivos de verano en secano (Sawchik y Ceretta, 2005).

Además fue demostrado por Giménez y García (2009), que la ETc no es estable entre años, presentando mayores rangos debido a altas demandas atmosféricas en los años con menores PP. Provocando de esta forma déficits hídricos aún más severos en períodos con PP por debajo del promedio.

La intensidad del déficit hídrico debe relacionarse en soja, como en cualquier otro cultivo, con la CAAD del suelo, con la capacidad de exploración radicular y con el estado de desarrollo del cultivo (Sawchik y Ceretta, 2005).

Como ya fue mencionado anteriormente la CAAD de los suelos en las regiones agrícolas tradicionales oscila mayoritariamente entre 80 y 160 mm. Esta característica de la CAAD origina que la autonomía hídrica de los suelos o sea la posibilidad de abastecer el consumo de agua de los cultivos sin la necesidad de recargas sea baja (Giménez 2004, Giménez 2007a). Sawchik y Ceretta (2005), evaluaron que las chacras sembradas después de un cultivo de invierno difícilmente alcanzaban el 50% de AD, lo que haría al cultivo mucho más dependiente desde el comienzo de su ciclo a las recargas provenientes de las PP. En siembras de primera los tiempos para la recarga del perfil son mayores, aumentando las posibilidades de obtener al momento de la siembra 100% del AD (Ernst et al., 2009).

A medida que se atrasa la fecha de siembra cobra importancia sobre el rendimiento la temperatura, al ser menor la temperatura durante el llenado de granos menor será la tasa de llenado. Igual incidencia tiene la radiación solar con el atraso de la fecha de siembra (Baigorri, 1997).

Las limitantes para la obtención de altos rendimientos en siembras de segunda son las condiciones a las que se expone el cultivo durante el período crítico (PC), por menor temperatura y radiación durante el llenado de granos y por el acortamiento del período de llenado por influencia fotoperiódica (Andrade et al. 2000, Giménez 2007).

Para el año agrícola 2009/10, el 60% del área sembrada de soja correspondió a siembras de segunda provocando como consecuencias las mencionadas anteriormente, además estas son más relevantes cuando las previsiones de PP están por debajo de la media (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2010).

2.3. CARACTERÍSTICAS ECOCOFISIOLÓGICAS

Los factores ambientales tales como temperatura, fotoperíodo y condiciones hídricas pueden modificar sustancialmente el desarrollo fenológico en soja (Frederick et al., Donatelli et al., citados por Desclaux y Roumet, 1996). Siendo la temperatura y el fotoperíodo los principales factores que regulan el desarrollo, determinan cuánto durará cada una de las fases, así como también, según las diferencias en la sensibilidad de cada cultivar, modifican la duración de las distintas etapas a partir de la siembra (Kantolic et al., 2003a).

El conocimiento de estas respuestas permite diseñar estrategias de manejo con el objetivo que los períodos claves coincidan con condiciones ambientales más favorables para el crecimiento del cultivo (Kantolic et al., 2003a).

El crecimiento, el desarrollo y por lo tanto el rendimiento de un cultivo de soja es consecuencia del potencial genético del cultivar y la interacción con el ambiente de producción. Las condiciones del ambiente están determinadas por las características del suelo como profundidad, estructura, resistencia mecánica, CAAD, aporte de nutrientes; así como características climáticas como temperatura, radiación, fotoperíodo y régimen hídrico (Andrade, 2000).

Desclaux y Roumet (1996), demostraron que el estrés hídrico afecta la fenología de las plantas de soja, y por lo tanto los componentes de rendimiento también son afectados.

Giménez (2007), reportó que la fecha de siembra es el factor más importante en determinar el comportamiento fenológico. En la medida que las fechas de siembra se atrasan, los ciclos en seis GM evaluados (III hasta el VIII) se acortaron. Este autor también demostró que los GM semi-precoces (III y IV) tienen el rango de ubicación temporal del PC más amplio y con mayor dependencia de la fecha de siembra; en cambio, los grupos de madurez más largos (VII y VIII) muestran un rango menor de ubicación del PC y menos dependencia en la ubicación del mismo de la fecha de siembra.

2.3.1. Principales estados de desarrollo de soja

Para la descripción de los principales estadios fenológicos externos, la escala desarrollada por Ferh y Caviness (1977), es la más utilizada.

En los estados vegetativos se describe la sucesiva aparición de hojas, teniendo en cuenta el número de nudos que presentan hojas totalmente desarrolladas. Mientras que los estados reproductivos se basan en la floración, el desarrollo de vainas, el desarrollo de los granos y la maduración (Kantolic et al., 2003a).

2.3.1.1. Estados vegetativos

Los procesos que conducen a la germinación comienzan una vez que la semilla ha absorbido una cantidad de agua que representa el 50% de su peso Raper y Kramer, citados por Kantolic et al. (2003), y se cumplen los requerimientos de temperatura (Hesketh et al., citados por Kantolic et al., 2003a).

Los nutrientes y las reservas de alimento en los cotiledones cubren las necesidades de la planta joven durante la emergencia y por 7 a 10 días después de VE (Ferh y Caviness, 1977). Durante ese tiempo los cotiledones pierden el 70 % de su peso seco. Luego de V1 la fotosíntesis de las hojas en desarrollo es suficiente para que la planta se mantenga a sí misma (Ritchie et al., citados por Baroffio y Ramos, 2009).

La fase germinación-emergencia es una de las más críticas donde factores como temperatura, humedad del suelo y profundidad de siembra son determinantes en el establecimiento de las plántulas y por lo tanto del éxito de implantación del cultivo (Kantolic et al., 2003a).

Después que los cotiledones han alcanzado la superficie, comienza la expansión de las hojas. Las dos primeras son unifoliadas y opuestas, pero todas las siguientes son trifoliadas y alternas (Kantolic et al., 2003a). Las ramas se originan a través de las yemas axilares, incluso la de los cotiledones pueden originar ramas. El número de ramas que crecen y el número de hojas que se expanden es altamente variable dependiente de los factores ambientales que regulan la tasa de crecimiento, como la disponibilidad hídrica y de nutrientes (Connor et al., Otegui, citados por Kantolic et al., 2003a).

El sistema radicular está constituido por una raíz principal y un gran número de raíces secundarias, que continúan su crecimiento conjuntamente al de la parte aérea. En general el 80% del peso seco y más del 40% de la superficie radicular se encuentra concentrado en los primeros 15 cm del suelo (Lersten y Carlson, citados por Kantolic et al., 2003a).

2.3.1.2. Estados reproductivos

El comienzo de la floración (R1) queda definido con la apertura de la primera flor en el tallo principal. Esta etapa es caracterizada por la aparición y crecimiento de flores, frutos y semillas, donde prosigue paralelamente la aparición de hojas (Kantolic et al., 2003a).

El crecimiento vegetativo y la producción de nudos continúa a través de los estados reproductivos en los cultivares indeterminados sobre el tallo principal y en los determinados sobre las ramas. En la planta la floración comienza en una posición intermedia del tallo principal, progresando hacia los nudos superiores e inferiores y desde la base hacia el extremo de las ramificaciones. La aparición de nuevas flores alcanza su máximo entre R2.5-R3 y culmina en R5 (Kantolic et al., 2003a).

La aparición de hojas continua por varios días después de R1, esta superposición es más pronunciada en genotipos indeterminados (Sadras et al., 2000). Esta etapa indica el comienzo de un período de acumulación diaria y constante de materia seca (MS) y nutrientes que continuará hasta poco después de R6.

La formación de vainas se inicia en los nudos inferiores, en este momento en la misma planta se encuentran vainas formándose, flores marchitas, flores abiertas y pimpollos. De esta manera queda evidenciada la superposición de etapas en la soja (Kantolic et al., 2003a).

Entre las etapas R5-R6 se alcanzan los máximos valores de altura, número de nudos y área foliar. Las semillas inician un período rápido de acumulación de MS y nutrientes (Kantolic et al., 2003a).

El inicio de la madurez fisiológica se logra cuando cesa la acumulación de MS, el signo más evidente de esto es cuando una vaina del tallo principal pierde su color verde y adquiere el color típico marrón pajizo. La semilla en este momento está compuesta en un 60 % por agua. La madurez completa se alcanza en R8, cuando el 95% de las vainas han alcanzado el color de madurez. A partir de R6 el amarillamiento y la abscisión de hojas se incrementan hasta alcanzar el estado de R8 (Kantolic et al., 2003a).

2.3.2. Factores que afectan el crecimiento y desarrollo

El nivel de fertilidad del suelo Longnecker et al., Rodríguez et al., citados por Miralles et al. (2003), la disponibilidad hídrica y la radiación Evans, Rawson, Passioura, citados por Miralles et al. (2003) pueden también modificar el crecimiento y la tasa de desarrollo del cultivo.

Los procesos que regulan el desarrollo de un cultivo son complejos, dado que responden tanto a factores genéticos como ambientales, existiendo interacciones entre ellos (Miralles y Slafer, citados por Miralles et al., 2003). La temperatura y el fotoperíodo regulan la duración de las fases de desarrollo de la soja (Kantolic et al., 2003a). Ambos factores actúan simultáneamente y hay algunas evidencias de que existen interacciones entre ellos (Sinclair et al., Summerfield et al., citados por Kantolic et al., 2003a). La mayoría de los cultivares presenta una corta fase juvenil durante la cual no responden al acortamiento de los días (Shanmugasundaram y Tsou, citados por Sadras et al., 2000).

Los principales efectos provocados por deficiencias hídricas sobre el desarrollo de la soja son el acortamiento de las etapas reproductivas por la aceleración de la emergencia de órganos y una disminución en el número de nudos. También provoca una secuencia más rápida entre fases (Desclaux y Roumet, 1996). Además de acelerar la senescencia foliar y del cultivo (Karam et al., 2005).

2.3.2.1. Disponibilidad hídrica

Los efectos del estrés hídrico sobre la fenología de la soja dependen no solo de características tales como duración y severidad, sino también del momento de ocurrencia relativo al ciclo de desarrollo del cultivo (Desclaux y Roumet, 1996).

Cuando el estrés ocurre durante emergencia de nudos se retrasa la aparición de nuevos nudos y se apresura la formación de órganos reproductivos en estos nudos. El entecimiento de la aparición de nudos fue reportado por (Desclaux y Roumet, 1996).

Según Sionit y Kramer (1977), plantas bajo estrés durante la formación de flores tienen períodos de floración más cortos, mientras que Korte et al., Meckel et al., citados por Desclaux y Roumet (1996), reportaron que el estrés hídrico durante etapas reproductiva tardías aceleraban la senescencia, reduciendo la duración del período de llenado de granos.

Desclaux y Roumet (1996), estudiando el efecto del estrés durante llenado de vainas reportaron que acorta el largo de este período hasta madurez fisiológica en aproximadamente una semana. Este período más corto reduce el crecimiento de las semillas por lo tanto reduce el peso de los granos (Sionit y Kramer, 1977).

Bajo estrés el desarrollo reproductivo de los primeros órganos iniciados detiene el establecimiento de los órganos tardíos, sugiriendo que los asimilados se concentran en los órganos más viejos en detrimento de los nuevos (Desclaux y Roumet, 1996).

2.3.2.2. Temperatura

La temperatura regula el desarrollo a lo largo de todo el ciclo, pero los requerimientos térmicos y las temperaturas cardinales que regulan la tasa de desarrollo difieren a lo largo del ciclo. La duración de las etapas fenológicas de soja se expresa en $^{\circ}\text{C}\cdot\text{día}^{-1}$. La temperatura tiene marcados efectos sobre la tasa de desarrollo durante la fase vegetativa (Sadras et al., 2000).

La temperatura base para la fase germinación-emergencia esta comprendía entre 6 y 9 $^{\circ}\text{C}$ presentando un rango optimo de temperaturas entre 25 y 30 $^{\circ}\text{C}$, temperaturas superiores a la optima enlentecen el crecimiento hasta detenerlo por encima 40 $^{\circ}\text{C}$ (Kantolic et al., 2003a). A lo largo del ciclo, la temperatura base tiende a disminuir y también se modifica el rango de temperaturas optimas (Kantolic et al., 2003a). En etapas reproductivas el establecimiento de vainas se retrasa con temperaturas inferiores a 22 $^{\circ}\text{C}$, mientras que cesa por debajo de los 14 $^{\circ}\text{C}$ (Jones et al., citados por Sadras et al., 2000).

2.3.2.3. Fotoperíodo

La soja es una especie que se considera de día corto con respuesta cuantitativa (Garner y Allard, citados por Kantolic et al., 2003a), ya que el pasaje de estado vegetativo a reproductivo se acelera con el acortamiento de los días, variando según la sensibilidad del material genético.

La mayor parte de los eventos reproductivos como la iniciación floral, la fructificación y el llenado de granos son reguladas por el fotoperíodo, condicionando el momento que comienzan y finalizan las diferentes fases y las tasas con que se desarrollan (Kantolic et al., 2003a).

Tanto el valor de fotoperíodo crítico, como la sensibilidad fotoperiódica presentan una considerable variabilidad genotípica. Los GM inferiores presentan umbrales elevados y baja sensibilidad, a medida que aumenta el GM disminuye el umbral y aumenta la sensibilidad, acentuándose en post-floración (Kantolic et al., 2003a).

El fotoperíodo también ejerce influencia sobre la duración de la floración, de la fructificación y del llenado de granos (Desclaux y Roumet 1996, Summerfield et al., citados por Kantolic et al. 2003a).

A medida que avanza el ciclo la sensibilidad al fotoperíodo tiende a aumentar (Grimm et al., citados por Kantolic et al., 2003a). Este comportamiento varía entre genotipos, presentado los GM superiores una mayor sensibilidad en post-floración que los grupos inferiores (Guiamet y Nakayama, Kantolic y Slafer, Summerfield et al., citados por Kantolic et al., 2003a).

2.4. REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DE SOJA

La producción de cultivos extensivos de grano persigue la cosecha de una parte de la biomasa total producida durante el ciclo de crecimiento. La biomasa producida es el resultado final de la captura de recursos (CO_2 , agua y nutrientes) por parte de las plantas, la cual tiene como principal fuerza motriz a la radiación solar a través de su participación en los procesos de fotosíntesis y transpiración (Otegui, 2009).

En condiciones normales de producción, los cultivos extensivos se ven expuestos en algún momento de su ciclo a condiciones donde la demanda atmosférica supera la capacidad de absorción o el AD en el suelo es limitante al no compensar las pérdidas por evapotranspiración, dando lugar a deficiencias hídricas (Otegui, 2009).

La transpiración implica un flujo de agua desde la fuente representada por el agua potencialmente extraíble almacenada en el suelo, hasta el destino representado por la atmosfera (Della Maggiora et al., 2000). Si las condiciones son favorables para la absorción de agua, cuanto más energía absorbe un canopeo más agua puede transpirar y más CO_2 puede fijar. Por lo tanto el rendimiento en grano está estrechamente asociado a la transpiración y fijación de CO_2 .

Entonces es importante que el cultivo pueda capturar la mayor cantidad posible del agua, utilizar el recurso capturado eficientemente para la fijación de CO_2 por medio de los estomas para la producción de fotoasimilados y convertir la mayor parte de los asimilados en órganos de cosecha (Passioura, citado por Dardanelli et al., 2003).

La magnitud de la evapotranspiración es afectada por la radiación, la humedad relativa, la temperatura y la velocidad del viento, variables meteorológicas que determinan la demanda evaporativa atmosférica y afectan la cantidad de agua utilizable por un cultivo (Gadner et al., citados por Della Maggiora et al., 2000).

La demanda evaporativa, es estimada a través de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), la cual es cuantificada por la tasa de evapotranspiración de una superficie cubierta por una gramínea en activo crecimiento que cubre totalmente el suelo y no presenta limitaciones hídricas (Doorenbos y Pruitt, citados por Della Maggiora et al. 2000, Allen et al. 2006). El método de FAO Penman-Monteith para la estimación de la ET_0 se ajusta a todas las regiones y climas.

La evapotranspiración real de un cultivo (ET_r), es la cantidad de agua perdida hacia la atmosfera desde el suelo y las plantas, que ocurre en situaciones reales de campo. Esta es estimada considerando la demanda atmosférica, las PP del período, la CAAD del suelo, los requerimientos hídricos y condiciones de crecimiento y desarrollo del cultivo (Giménez y García, 2009).

Los requerimientos máximos de agua de un cultivo se representan a través de la evapotranspiración del cultivo (ET_c), la cual representa la ET de un cultivo libre de enfermedades, sin limitaciones hídricas y nutricionales que logra el rendimiento potencial (Hillel, citado por Della Maggiora et al., 2000).

2.4.1. Factores meteorológicos que afectan a la evapotranspiración

La demanda atmosférica es inherente a cada ambiente y se caracteriza a través de la ETO. La principal fuerza motriz que afecta la demanda es la cantidad de radiación solar que alcanza la superficie terrestre, fuente de energía necesaria para promover el cambio de estado del agua de líquido (en el suelo y las plantas) a gaseoso (en la atmósfera) (Otegui, 2009).

Factores como la velocidad del viento y el porcentaje de humedad del aire también condicionan este cambio de estado. Si hay viento, la evaporación puede continuar aun después de la puesta del sol, mientras que en condiciones de ausencia de viento, en general cesa en ausencia de radiación solar (Hillel, citado por Della Maggiora et al., 2000).

2.4.2. Agua disponible

La cantidad de agua que un cultivo puede consumir bajo condiciones limitantes depende de factores del suelo, como la cantidad de AD para las plantas y la conductividad hidráulica; características del cultivo como cobertura, altura, rugosidad, profundidad de las raíces, la conductancia hidráulica de los tejidos vasculares y rasgos tales como la capacidad de ajuste osmótico y también de la intensidad de la demanda atmosférica que es inherente a cada ambiente y se caracteriza a través de la ETO (Dardanelli et al., 2003).

El AD para el cultivo va a depender de su profundidad de arraigamiento. Para ello tendremos que tener en cuenta donde se acumula el mayor porcentaje de raíces y hasta que profundidad la exploración es significativa. La curva de retención de agua de un suelo es la relación entre el contenido de agua y el potencial de matriz que es generado por diferentes mecanismos de retención. Cuanto más seco está el suelo el potencial de matriz es mayor, el agua está retenida con mayor energía (Allen et al., 2006).

La capacidad de retención de agua de un suelo y su disponibilidad para las plantas dependen de la profundidad, textura, presencia de horizontes arcillosos, de la profundidad de arraigamiento y de factores físicos, químicos y biológicos que pueden afectar tanto al suelo como a las raíces (Dardanelli et al., 2003).

Andriani (2002), reportó que sólo el 50% de la cantidad máxima de AD en el suelo, es fácilmente extraíble por los cultivos. El 50% restante es utilizado por la planta bajo condiciones de estrés hídrico cada vez más intenso a medida que disminuye su contenido. Por lo tanto, el límite de estrés hídrico está fijado en el 50% del contenido de agua útil del suelo explorado por las raíces.

Uruguay, presenta períodos de alta demanda atmosférica habitualmente en enero, situaciones donde el perfil está saturado al comienzo de la estación de crecimiento y con mayor facilidad de recarga enfrentaran una situación de menor riesgo de sufrir deficiencias hídricas. Sin embargo hay que tener en cuenta que las capacidades potenciales de almacenaje de nuestros suelos en general son significativamente menores que las de las zonas sojeras más productivas del mundo (Sawchik y Ceretta, 2005).

A pesar de que en teoría existe AD hasta alcanzar el punto de marchitez permanente, la cantidad de agua extraída por el cultivo se reducirá significativamente antes de alcanzar el punto de marchitez permanente. Cuando el contenido de humedad del suelo está por debajo de cierto valor umbral, el agua del suelo no podrá ser transportada hacia las raíces con la velocidad suficiente para satisfacer la demanda transpiratoria y el cultivo comenzara a sufrir un estrés (Allen et al., 2006).

El factor de agotamiento (p) es la fracción de agua que puede ser agotada en la zona radicular antes de que se presente un estrés hídrico. Un valor de 0,50 es utilizado comúnmente para una gran variedad de cultivos incluyendo a la soja (Allen et al., 2006).

Es difícil adoptar un valor de nivel de agotamiento permisible válido para todas las situaciones, pues depende del cultivo, de la tasa de evapotranspiración y del factor de ahorro de agua que quiera establecerse.

El valor (p) depende también del tipo de suelo. En general, se puede establecer que para suelos de textura fina (arcillosos) pueden ser reducidos en un 5-10%, mientras para suelos de textura más gruesa (arenosos), estos pueden incrementarse en un 5-10% (Allen et al., 2006).

En tal sentido un estudio realizado por Dusek et al., citados por Caraballo (1990), obtuvieron los mayores rendimientos cuando aplicaron un riego después de agotado el 60% del AD del suelo, en cambio cuando regaron con sólo 40% de agotamiento el rendimiento se redujo, de igual forma cuando se regó con 80% de agotamiento.

Caraballo (1990), reportó que a partir de la siembra y hasta V5-V6, se debe regar aplicando una lámina para reponer el 50% del AD en los primeros 20cm de suelo. Después V5-V6 y hasta que se alcance el estado de vainas verdes, se debe reponer 60% de la humedad útil en los primeros 40 cm del suelo. Después de ese estado se debe reponer el 40% de la humedad útil en los primeros 40cm del suelo.

2.4.3. Consumo de agua

Las limitantes al consumo de agua son el principal factor de pérdidas de rendimiento en cultivos de secano (Boyer, citado por Dardanelli et al., 2003). La cantidad total de agua consumida por un cultivo varía entre años y regiones, estas variaciones dependen de la demanda atmosférica, la duración del ciclo del cultivo y del área foliar que éste desarrolla (Andriani, 2002).

Cuando el contenido de AD se encuentra por encima de un umbral crítico, el consumo de agua está determinado por la tasa de transpiración cercana a la determinada por la demanda atmosférica. Por el contrario cuando el contenido de agua, es inferior al umbral crítico, la tasa de transpiración depende de la capacidad del cultivo para absorber el agua del suelo (Dardanelli et al., 2003).

La E_{Tc} se relaciona con la E_{To} a través del coeficiente del cultivo (K_c), factor que integra el efecto de las características morfológicas y fisiológicas del cultivo tales como (cobertura, altura, rugosidad y resistencias al flujo del agua). El K_c varía tanto entre especies, como así también a lo largo de ciclo de un mismo cultivo (Hillel, citado por Della Maggiora et al., 2000). Presentando el K_c valores mínimos en la emergencia, hasta alcanzar sus máximos cuando se logra la máxima cobertura y luego decrece a medida que el cultivo alcanza la madurez fisiológica. En un estudio donde se compararon los coeficientes de diferentes cultivos girasol, maíz y soja está última presentó el menor K_c (1,08) pero permaneció por más tiempo con K_c superior a 1 (Della Maggiora et al., 2000).

Karam et al. (2005), reportaron un valor de K_c de 0.62 en el estado V10, y después este aumenta a 0.84 en R2, durante R3 alcanza un valor máximo de 1.0 indicando que en esta etapa E_{Tc} es igual a la E_{To} .

El consumo de agua por parte de un cultivo aumenta a medida que se incrementa el área foliar y la intercepción de radiación fotosintéticamente activa y llega a un máximo antes de lograr la cobertura completa (Rhoads y Bennett, citados por de Della Maggiora et al., 2000).

Los resultados reportados por Karam et al. (2005), indican que el 65% de la evapotranspiración en la soja ocurre durante el período comprendido entre R3 y R5, mostrando mayor sensibilidad al estrés hídrico durante dicho período. De hecho, la relación E_{Tc}/E_{To} fue 1.0 en R3, revelando un alto requerimiento de agua en esta etapa de crecimiento del cultivo.

Una deficiencia de agua que produzca una reducción en la transpiración trae aparejada una reducción en la producción de biomasa (Andrade et al., citados por Hernández y Osorio, 2007). Para cultivos con buena disponibilidad hídrica, el consumo

acumulado representa la ETc, la cual depende de la ETo, de la evolución del Kc y de la duración del ciclo (Della Maggiora et al., 2000).

A medida que la soja alarga su ciclo, aumenta la cantidad total de agua consumida. El largo del ciclo de un cultivo de soja variará fundamentalmente con la fecha de siembra y con la sensibilidad al fotoperíodo del cultivar (Andriani, 2002). En tal sentido Sawchik y Ceretta (2005), reportaron una ETr diferente cuando compararon dos cultivares contrastantes (DM 3700 y A 6019). Los autores observaron el efecto del estrés hídrico en la menor ETr para cultivares precoces. Durante el ciclo hubo aumento en la demanda atmosférica, pero debido a los niveles bajos de AD en el suelo provocó un menor uso del agua que el potencial y esto afectó en mayor medida al cultivar DM 3700 en su PC. En siembras de noviembre, los materiales de ciclo más largo enfrentan en general su PC durante períodos de menor demanda atmosférica en comparación con cultivares precoces.

Della Maggiora et al. (2000), evaluaron la evolución de la ETc en maíz, girasol y soja, encontrando que la soja presentó mayores valores de ETc, durante etapas iniciales y menores cuando alcanzo su máximo desarrollo. Las siembras más tardías en soja exponen a una demanda atmosférica mayor en etapas iniciales. La ETc mantuvo valores cercanos a la ETo, salvo en el período comprendido entre R1-R6 donde fueron más altos.

Este mismo comportamiento coincide con los presentados por Reicosky y Heatherly, citados por Della Maggiora et al. (2000), donde la ET se incremento desde V3 hasta V6 y presentó los máximos valores entre R1 y R6. La media estacional fue de 4 mm día⁻¹ y los máximos valores fueron de 7,6 mm día⁻¹, presentando un ciclo de 117 días.

Karam et al. (2005), muestran que durante la iniciación de vainas y fin de llenado del grano la evapotranspiración acumulada fue de 299 mm, con un valor promedio de 5.9 mm por día. El promedio de evapotranspiración de la soja fue 5.5 mm por día durante todo la estación de crecimiento. En un estudio realizado en Balcarce, la eficiencia en el uso del agua (EUA) estimada para la soja fue de 9,1 Kg.ha⁻¹ mm, este menor valor comparado con el encontrado en maíz de 18,1 Kg.ha⁻¹ mm es explicado por la baja eficiencia fotosintética y por la mayor concentración energética del grano de soja (Andrade, citado por Della Maggiora et al., 2000).

Se reportan en la bibliografía EUA que rondan valores entorno de 5-6 Kg ha⁻¹ mm (Clawson et al., Scott et al., Hattendorf et al., citados por Della Maggiora et al., 2000). En otros ensayos realizados Quaglieta Charandá y Mori, citados por Della Maggiora et al. (2000), reportaron una EUA de 11 Kg.ha⁻¹ mm. Scott et al., citados por Sincik et al. (2008), reportaron que la EUA promedio en 5 años de evaluación fue de 6 Kg ha⁻¹ mm cuando se regaba y aumento a 7,3 Kg.ha⁻¹ mm en secano.

Doorembos y Kassam, citados por Sincik et al. (2008), reportaron de que las necesidades de agua para la máxima producción varía entre 450 y 700 mm, dependiendo del clima y de la duración del ciclo.

2.4.4. Profundidad radical y absorción de agua

El crecimiento del sistema radical de una planta es afectado por la disponibilidad de agua y nutrientes, la compactación del suelo, la temperatura, disponibilidad de asimilados y el genotipo (Gadner et al., citados por Della Maggiora et al., 2000).

En la soja, la raíz primaria deja de crecer algún tiempo después de la germinación por lo que la exploración de nuevas zonas del suelo es consecuencia de lo realizado por las raíces secundarias (Venturi y Amaducci, citados por Andrade, 2000).

La absorción de agua de un cultivo bajo condiciones limitantes depende de factores del suelo como la cantidad de AD y la conductividad hidráulica y del cultivo, como la densidad, profundidad de las raíces, la conductancia hidráulica de los tejidos vasculares y la capacidad de ajuste osmótico (Nilsen y Orcutt, citados por Dardanelli et al., 2003).

La capacidad de exploración puede ser afectada negativamente por un mal desarrollo del sistema radical durante la etapa de implantación, como la mala preparación del suelo. Esto puede afectar la capacidad posterior del cultivo para la absorción de agua y nutrientes (Aguirrezabál et al., citados por Andrade y Sadras, 2000).

La profundidad de raíces de soja, medidas en un suelo sin limitaciones para su crecimiento en varios cultivos muestra un patrón sigmoideo que alcanza la máxima profundidad durante el llenado de granos (Andriani, citado por Dardanelli et al., 2003).

La exploración del perfil del suelo por las raíces permite posponer los efectos de la sequía sobre el crecimiento de los cultivos (Dardanelli et al., 1991). Kramer, citado por Andrade y Sadras (2000), mostró una mayor velocidad de avance del frente de extracción de agua en cultivos de soja sometidos a déficit hídricos, en comparación con los testigos regados.

En soja la profundidad máxima alcanzada fue de 200 cm cuando el cultivo se encontraba en el período de llenado y la velocidad de exploración fue de 28 mm.día^{-1} (Andriani, 2002).

2.4.5. Manejo del agua del suelo

El balance de agua de un suelo donde crece un cultivo resulta de las diferencias entre los ingresos y los egresos. El agua que ingresa puede provenir de las PP, del riego y por escorrentía superficial. Los egresos se producen por la evaporación del agua de la superficie del suelo, la transpiración del cultivo, escorrentía hacia áreas más bajas y drenaje por debajo de la zona de exploración radicular (Dardanelli et al., 2003).

Existen diversos factores que afectan la CAAD de los suelos de los cuales pueden sintetizarse en dos grandes grupos: por un lado aquellos relacionados con la génesis del suelo como la textura o la profundidad del perfil y por otro lado factores de manejo que afectan la capacidad de recarga de agua de los suelos como la época de siembra, la duración del período de barbecho, el cultivo antecesor, el estado estructural de los suelos (Sawchik y Ceretta, 2005).

La transpiración del cultivo es la única pérdida productiva, ya que la producción de MS es proporcional a la transpiración. Por otro lado todas las otras vías constituyen pérdidas que disminuyen la eficiencia agronómica en el uso del agua, es decir los Kg. de grano producidos por cada mm de agua que entra al sistema (Otegui, 2009).

Para atenuar la intensidad del estrés hídrico sobre todo durante los PC, las prácticas de manejo deberán orientarse a obtener un balance de agua más favorable. Una de las vías para lograr este objetivo es la utilización de prácticas de manejo que mantengan los residuos de cosecha sobre la superficie, como lo es la siembra directa o laboreo reducido, lo cual disminuye la escorrentía, disminuye la evaporación desde el suelo e incrementa el AD para la transpiración (Dardanelli et al., 2003).

El efecto del rastrojo en superficie contribuye a reducir las pérdidas de agua por evaporación aumentando la EUA Unger y Stewart, citados por Andrade y Sadras (2000), como también puede producir una mayor infiltración ya que disminuye la velocidad de escurrimiento. La disponibilidad de agua en el suelo es generalmente mayor en sistemas de siembra directa que en laboreo convencional (Rizzalli, citado por Andrade y Sadras, 2000).

Cooper et al., citados por Dardanelli et al. (2003), menciona algunas prácticas de manejo para disminuir la proporción de agua evaporada desde el suelo entre las que se destaca la cobertura por rastrojos. Y por otro lado aquellas medidas de manejo que aumentan el AD para la transpiración ellas son riego suplementario, manejo del suelo para reducir la escorrentía, control de malezas y cultivares con sistemas radiculares más profundos y densos.

Sistemas de laboreo reducido mejoran la eficiencia de almacenamiento de agua de las PP y la disponibilidad de agua en el suelo en las primeras etapas del cultivo

(Nielsen et al., 2002). En etapas posteriores la disponibilidad hídrica para el cultivo depende de las PP.

Con la adopción de la siembra directa se asegura una adecuada cobertura del suelo con rastrojos, particularmente en las primeras etapas del cultivo. Estos rastrojos contribuyen a reducir pérdidas de agua por evaporación con el consiguiente aumento en la eficiencia en el uso del agua evapotranspirada (Unger y Stewart, citados por Sawchik, 2000). Este sistema de labranza también puede producir una mayor infiltración del agua de lluvia. Por lo tanto, la disponibilidad de agua en el suelo y el consumo de agua en los momentos críticos son generalmente mayores en siembra directa que en labranza convencional (Sawchik, 2000).

Una práctica que promueve la obtención de mayores contenidos de AD al momento de la siembra es el mayor tiempo de barbecho y sin malezas extrayendo agua del suelo (Ernst et al., 2009).

2.5. INFLUENCIA DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA SOBRE EL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE SOJA

2.5.1. Efectos sobre la producción de biomasa

El consumo de agua y el crecimiento de los cultivos se reducen cuando el contenido hídrico en la zona de exploración radicular se ubica por debajo del 40-60% de agua útil (Shaw, Muchow y Sinclair, Dardanelli et al., citados por Andrade y Sadras, 2000).

La disminución en la producción de biomasa en cultivos sometidos a deficiencias hídricas puede deberse por un lado a una reducción en la interceptación de radiación y/o por una disminución en la eficiencia de conversión de radiación interceptada en biomasa. La reducción en la radiación interceptada ante deficiencias hídricas es consecuencia de una menor expansión de hojas y/o una mayor senescencia foliar (Andrade y Sadras 2000, Karam et al. 2005, Sincik et al. 2008).

La reducción de la eficiencia de conversión se debe a una caída en la tasa fotosintética por unidad de área foliar. La expansión de los tejidos es mucho más sensible al déficit hídrico que el proceso de fotosíntesis (Sadras y Milroy, citados por Andrade y Sadras, 2000). Cuando el déficit ocurre en los primeros estadios de desarrollo, la soja se recupera mejor que otros cultivos (Karam et al. 2005, Doss y Thurlow, citados por Dos Santos 2007).

Desclaux et al. (2000), evaluando dos intensidades de deficiencias hídricas entre V4 y R1, reportaron que la única variable que significativamente era afectada fue la

longitud de los entrenudos y altura, dando lugar a una menor acumulación de MS. Esto concuerda con lo publicado por Eck et al., Elmore et al., Giovanardi et al., Son et al., citados por Desclaux et al. (2000), Karam et al. (2005), donde indican que diferentes intensidades de déficits durante la etapa vegetativa no afectaron los componentes del rendimiento.

2.5.2. Área foliar e intercepción de radiación

Descenso en el área y peso foliar en soja fueron reportados por Mayaki et al., Pandey et al., Cox y Joliff, citados por Andrade y Sadras (2000). En un estudio realizado por Andrade y Sadras (2000), donde se midió los efectos del déficit hídrico sobre el índice de área foliar (IAF), las reducciones fueron significativas ya que coincidieron con el período de activo crecimiento vegetativo. Esta reducción fue explicada por una reducción en el crecimiento foliar y aceleración de la senescencia de hojas.

La menor cantidad de intercepción de radiación, reduce la cantidad de fotoasimilados sintetizados y de esta forma la cantidad que será translocada hacia los órganos reproductivos. Por esta razón aumenta el aborto de flores, óvulos y vainas (Thomas y Costa, 1994).

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 la planta. Las deficiencias con intensidades mayores (contenidos entre 20 y el 40 % de AD) podrían producir reducciones en rendimiento en semilla del orden del 10% (Dusek et al., citados por Eck et al. 1987, Andriani, citado por Andrade y Sadras 2000).

Sincik et al. (2008), en un estudio donde evaluaron diferentes niveles de riego, mencionan que el área foliar por planta y IAF fueron menores cuando la cantidad de agua aplicada fue menor. Esto coincide con los resultados expresados por Karam et al. (2005) donde indicaron que estos parámetros se ven afectados negativamente por el déficit hídrico debido a la menor turgencia de los tejidos por la falta de agua.

Dos Santos (2007), reportó que en un experimento donde se evaluaron diferentes estrategias de riego en base a la ETo, el tratamiento donde se aplicaron 120% de disponibilidad con respecto a la ETo, fue el que presentó menor IAF, ese hecho fue explicado porque el exceso hídrico causa reducciones en el crecimiento.

2.5.3. Eficiencia de conversión

Aunque menos sensible que la expansión foliar, la eficiencia de conversión, también puede reducirse en condiciones de estrés hídrico. Las sequías inducidas

experimentalmente redujeron la eficiencia de conversión en soja (Andriani et al., Otegui, citados por Andrade y Sadras, 2000).

Según Salinas et al. (1996), estudiando el efecto de sequías en diferentes cultivares, reportaron que al disminuir el contenido de agua en el suelo, baja la tasa transpiratoria, también la turgencia es menor produciendo el cierre de estomas lo que provoca una disminución de la conductancia estomática. Estos mismos autores cuantificaron el efecto sobre la conductancia estomática, este fue 60% menor en R2 y 40% en R3 comparado con el tratamiento sin deficiencias. Estudios realizados por Karam et al. (2005), Sincik et al. (2008), indican que al haber menor contenido de agua en el suelo disminuye el intercambio gaseoso de las hojas por el cierre estomático para conservar la turgencia de los tejidos, y la transpiración disminuye.

2.5.4. Efecto sobre la tasa de crecimiento del cultivo (TCC).

Como ya fue mencionado anteriormente, la TCC es afectada por el déficit hídrico mediante la reducción de la eficiencia de conversión y menor expansión foliar lo que reduce la intercepción de luz (Karam et al., 2005).

Según Frederick et al. (2001), los efectos negativos del déficit hídrico sobre la TCC solo tienen impacto en el rendimiento cuando la planta alcanza el estado reproductivo, coincidiendo con lo reportado por Johnson et al., Jiang y Egli, citados por Modali (2004).

Para lograr altos niveles de TCC en el período deseado se debe tener altos niveles de IAF, adecuada disponibilidad hídrica y radiación solar (Modali, 2004).

Board y Harville, citados por Modali (2004), indicaron que el rendimiento de la soja puede ser aumentado minimizando el estrés ambiental que enlentece la TCC entre emergencia y comienzo de llenado de granos (R5).

La TCC durante el período comprendido entre las etapas de floración y llenado de granos tiene una relación directa lineal sobre el número de granos (No. de granos) principal componente de rendimiento (Egli y Yu 1991, Egli y Bruening 1999, Frederick et al. 2001, Kantolic et al. 2003, Modali 2004, Oya et al. 2004).

El aumento de fuente en el PC, expresado como la TCC, genera un mayor No. de granos a cosecha mediante mayores valores de número de vainas por área, generando una combinación de aumento de nudos, nudos reproductivos y vainas por nudos reproductivos (Board y Modali, 2004).

2.5.5. Respuesta de la soja al estrés hídrico y rendimiento en grano

La disminución del rendimiento a causas del estrés por deficiencias hídricas depende del estado fenológico, duración y severidad de éste, debido a la diferente capacidad de compensación que posee la soja según el momento del ciclo.

La soja es considerada una planta no tolerante a la sequía, siendo menos sensible al estrés hídrico durante la fase vegetativa, algo sensible durante floración y fijación de vainas y muy sensible durante el llenado de granos (Shaw y Laing, Shipley y Regier, Dusek et al., Doss et al., Sionit y Kramer, Constable y Hearn, Krote et al., citados por Eck et al., 1987).

Condiciones desfavorable 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 de peso de los granos una vez superado el estrés (Andriani et al., citados por Desclaux et al., 2000).

Si el estrés hídrico ocurre durante la fase vegetativa o reproductiva temprana reduce el rendimiento por causa de una disminución del No. de granos por unidad de superficie (Sionit y Kramer 1977, Ashley y Ethridge 1978, Eck et al. 1987, Brevedan y Egli 2003).

Aunque según Eck et al. (1987), Karam et al. (2005), reportaron que la ocurrencia de deficiencias hídricas antes de la fijación de vainas no compromete significativamente el rendimiento siempre que se alcance una altura de planta adecuada para obtener un alto No. de granos.

Las máximas pérdidas en rendimiento se producen cuando el estrés coincide con el PC de determinación del rendimiento, que va desde R4 a R6 (Sionit y Kramer 1977, Andrade y Sadras 2000, Kantolic et al. 2003, Karam et al. 2005, Dogan et al. 2007).

Si la sequía se revierte relativamente temprano (antes de R4), el menor No. de granos puede compensarse por un aumento en el peso de los granos. Aunque estas compensaciones no son totales habiendo pérdidas de rendimiento (Karam et al. 2005, Dogan et al. 2007).

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., 2003b).

2.5.5.1. Efecto del estrés durante floración

Si el déficit ocurre entre R1 y R5, intensidades medias de deficiencias (40 a 50% de agua útil), donde la TCC es afectada pueden ocasionar reducciones en el rendimiento del 10% y deficiencias severas reducen un 20% o más (Board y Harville, Board y Tan, Lin kemer et al., citados por 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 las semillas, si cesa la deficiencia hídrica en la etapa siguiente (Andriani, 2002).

En floración y formación de vainas un estrés hídrico durante el desarrollo de las flores causaría abortos debido al deterioro de las funciones del óvulo y no al deterioro del polen (Kokubun et al., 2001).

Según Kantolic (2003), este período no sería tan crítico ya que la planta genera mucho más flores de las que puede sostener y la pérdida de vainas en estos estados puede ser compensado por fijación de otras vainas en los siguientes estados, debido a la superposición de estos, una vez levantado el estrés. Además aumentaría la disponibilidad de asimilados por unidad de grano lo que incrementaría el peso promedio de los granos minimizando la pérdida de rendimiento.

Sadras y Calviño (2001), estimaron mediante una ecuación de la recta ajustada, donde se evidencia que un déficit hídrico de 200 mm desde R3 hasta R5, puede reducir hasta 2/3 la producción. Por cada mm de déficit hídrico observado hay una reducción de 16 Kg ha en la productividad.

2.5.5.2. Efecto del estrés durante la formación de vainas

Cuando 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), demostraron 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, coincidiendo con los resultados de (Oya et al., citados por Sincik et al., 2008).

La formación de vainas y comienzos del llenado de granos (R4-R6) es el período más sensible a pérdidas de rendimiento (Kantolic et al., 2003b). Es donde 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 significativas de rendimiento, en la medida que exista una reducción importante en el No. de granos por superficie. A partir de esta

etapa no se generaran nuevas estructuras reproductivas para compensar un bajo No. de granos fijados en las etapas anteriores (Sionit y Kramer 1977, Kantolic et al., 2003b).

2.5.5.3. Efecto del estrés durante llenado de granos

Karam et al. (2005), demostraron que cuando los períodos afectados por deficiencias eran R5 y R7, el estrés produce la reducción simultánea del número de vainas y de granos.

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).

La duración del período de llenado de grano Metz et al., Smith y Nelson, citados por Brevedan y Egli (2003) y el peso promedio de los granos es determinado genéticamente Pandey y Torrie, citados por Dos Santos (2007), 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 peso del grano (Sionit y Kramer 1977, Salinas et al. 1996, Dogan et al. 2007).

Según Neumaier et al., citados por Dos Santos (2007), la ocurrencia de estrés durante el inicio del llenado, puede reducir drásticamente el rendimiento ya que la mitad de los nutrientes necesarios para el llenado provienen del suelo y de la FBN, proceso también afectado durante un estrés.

Las condiciones hídricas adversas después de R6 afectan principalmente el peso de los granos, mientras que si ocurren entre R5 y R6 afectan tanto el número como el peso de los granos fijados (Shaw y Laing, citados por Andrade y Sadras 2000, Karam et al. 2005, Dogan et al. 2007).

Desclaux et al. (2000), indicaron que hubo disminución del peso de granos sobre todo cuando la intensidad de la sequía fue mayor, explicado por un período de llenado de granos menor.

Brevedan y Egli (2003), evaluando estrés hídrico durante diferentes etapas en el llenado indicaron, que se produce una reducción de 39 % en el rendimiento y del 24 % en peso de granos con estrés durante todo el llenado. Cuando el estrés fue corto y 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%. Los resultados explicados fueron similares a los obtenidos por (Andriani, 2002).

Andriani et al., citados por Andrade y Sadras (2000), 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 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 más corto.

El estrés continuo durante el llenado de grano acelera la senescencia y baja el rendimiento explicado porque las plantas pierden más rápidamente nitrógeno y clorofila por sus hojas que plantas no estresadas (Desclaux y Roumet 1996, Brevédan y Egli 2003).

El levantamiento del estrés hídrico después de períodos de deshidratación en R5 y 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).

3. MATERIALES Y METODOS

3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

El ensayo se realizó en el campo experimental de riego de la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni” de la Facultad de Agronomía, ubicada sobre la ruta 3, Km. 363, en el Departamento de Paysandú, Uruguay (32°22' S 58°03' W), durante el año agrícola 2009/2010. El experimento se realizó sobre un Brunosol subeútrico típico perteneciente a la unidad San Manuel según la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay, incluida dentro de la formación Fray Bentos.

A través del análisis químico del suelo realizado previo a la instalación del ensayo se constató un contenido de materia orgánica de 3.3%, de N-NO₃ de 8 ppm y de P de 10 ppm.

Cuadro No.1: Características hidrológicas del suelo

Horizonte	Profundidad (cm.)	Dap (gr/cm ³)	CC (mm)	PMP (mm)	CAAD (mm)
A	0-20	1.25	54	28	26
B	20-70	1.34	235	150	85
A-B	0-70		289	178	111

Dap: Densidad aparente, CC: Capacidad de campo, PMP: Punto de marchitez permanente, CAAD: Capacidad de almacenaje de AD.

3.1.1. Manejo experimental

El laboreo realizado fue de tipo convencional y constó de dos pasajes de rastra excéntrica y uno de vibro cultivador.

El 24 de octubre se fertilizó con 300 Kg/ha⁻¹ de Fosfato diamónico (18-46-0) que fue incorporado con excéntrica.

El ensayo se sembró el 7 de diciembre con una sembradora experimental (Wintersteiger PLOTMAN, Gesellschaft m.b.n. &CO, Austria), se utilizó una distancia entre hileras de 0,40 m. El cultivar utilizado fue el DM 5.1i, con hábito de crecimiento indeterminado. En V2 se realizó ajuste manual de plantas con el objetivo de lograr una población de 450000 pl./ha.

El 2 y 22 de febrero se aplicó Clorpirifos para control de lagarta de hoja, la dosis utilizada fue de 1 lt. PC/ha. El 22 de febrero se aplicó Tiametozam + Lambdacihalotrina

en dosis de 1 lt/ha para el control de chinches. Además se realizaron los controles necesarios de malezas mediante la aplicación de herbicidas.

Cuadro No. 2: Calendario de eventos fenológicos

Fecha	Estado fenológico	Días post emergencia
07/12/2009	Siembra	
14/12/2009	Emergencia	0
08/01/2010	V3	25
21/01/2010	R2	38
26/01/2010	R3	43
15/02/2010	R4	63
21/02/2010	R5	69
18/03/2010	R6	94
07/04/2010	R8	114

Para la aplicación de la metodología experimental consideramos el período comprendido entre los estadios R4-R6 como el PC para la determinación del rendimiento.

3.1.2. Tratamientos

Los tratamientos evaluados fueron tres, los cuales se denominaron de la siguiente forma:

- T1: Bienestar hídrico. El contenido de agua en suelo durante el PC fue superior a 60% AD y durante los periodos no críticos (PNC) superior a 40% AD.
- T2: Deficiencias hídricas en el PC. El contenido de agua en suelo durante el PC fue inferior a 60% AD y superior a 40% de AD durante el PNC.
- T3: Secano. El contenido hídrico del suelo no fue alterado por intervenciones.

Para lograr los umbrales de contenido hídricos de suelo definidos se realizaron dos tipos de intervenciones: riego suplementario y contención de las PP en el tratamiento con déficit hídrico a través de la utilización de simuladores de sequía parcelarios y móviles. Los mismos son estructuras construidas en hierro con cubiertas de lonas impermeables. Las dimensiones de estos se adecuaron al tamaño de las parcelas. El tamaño de estas fue de 2m x 5m (5 hileras).

Los simuladores se colocaron sobre las parcelas del tratamiento con deficiencias hídricas, inmediatamente antes de cada evento de PP y fueron retirados después de que transcurriera el mismo. El manejo de los simuladores pretendió no modificar significativamente las condiciones de radiación solar y temperatura. Estas parcelas estuvieron limitadas externamente por una ronda construida en tierra que intentó impedir la entrada de agua proveniente del escurrimiento. Asimismo fueron construidos desagües para evacuar el exceso de agua.

Las características singulares del periodo experimental caracterizado por excesos de PP y la ocurrencia de eventos extremos de vientos, determinaron que a través de la metodología empleada no se lograra controlar la disponibilidad hídrica durante las primeras etapas del cultivo.

Se utilizó un sistema de riego por goteo que permite para agregar agua con gran precisión en el volumen y en la etapa de desarrollo definida. Cada hilera del cultivo dispuso de una cinta de goteros con un caudal de 1.47 litros hora⁻¹ espaciados cada 20cm.

Dadas las condiciones del año y los umbrales definidos de AD, la aplicación de riegos suplementarios fue necesaria a partir de alcanzada la etapa reproductiva. Se aplicó un total de 182 mm en cinco riegos, únicamente en el T1.

Se realizó un balance hídrico (BH) de suelo diario, de acuerdo a la siguiente fórmula: $BH=R+PP-ET_c$, siendo R=mm agregados de agua de riego, PP=mm de lluvia y ET_c =mm de evapotranspiración de cultivo, calculada por el método $ET_c= ETo \times Kc$. Donde ETo es la evapotranspiración del cultivo de referencia y Kc es el coeficiente del cultivo. La ETo fue calculada utilizando la ecuación de FAO Penman-Monteith y el Kc recomendados por FAO.

3.1.3. Diseño experimental

El diseño experimental utilizado fue el de bloques completos al azar (BCA) con tres repeticiones.

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$$

Donde:

i: 1; 2; 3 tratamientos

j: 1; 2; 3 bloques

Y_{ij} : es el valor del i-esimo tratamiento, en el j-esimo bloque.

μ : media poblacional

τ_i : efecto del tratamiento (T1; T2; T3; T4; T5)

B_j: efecto bloque B1; B2; B3

ϵ_{ij} : error experimental

Las variables medidas fueron: rendimiento en grano, No. de granos por m², peso promedio de granos y biomasa de la parte aérea. Se ajustaron modelos de regresión lineal simple en los componentes primarios de rendimiento.

3.2. DETERMINACIONES

3.2.1. Determinaciones durante el ciclo del cultivo

En el desarrollo del cultivo se determinaron las siguientes variables:

- MS: Se efectuaron tres muestreos en diferentes etapas del ciclo, el primer corte fue el día 44 post-emergencia encontrándose el cultivo en el estadio de R3, el segundo fue el día 72 post-emergencia encontrándose en R5 y el último el día 94 post-emergencia previo al estadio R6. Se cortó al ras del suelo 1 m lineal por parcela, las muestras fueron secadas en estufa a 60°C hasta alcanzar un peso constante.
- Elaboración de balances hídricos de suelo, en los que se estimaron las pérdidas y ganancias de agua en el suelo.

Los muestreos de MS se hicieron con el objetivo de evaluar la evolución de esta, como también para medir la TCC en el PC como predictor del rendimiento.

La evolución del AD se hizo para corroborar que las condiciones ambientales de los diferentes tratamientos fueran acordes a los objetivos planteados y que estas se mantengan dentro de los estándares ya señalados. Además de tener un indicador mientras se realizaba el ensayo de cuándo y cuánto regar.

3.2.2. Determinaciones a cosecha

Para rendimiento y sus componentes se cosecharon manualmente entre 2 y 4 m lineales de plantas representativos de la hilera central de cada parcela para evitar el efecto “borde de parcela”.

Luego de la cosecha se trilló la totalidad de la muestra con trilladora fija y se determinó el rendimiento en grano para cada tratamiento. Además se obtuvo el peso de mil granos mediante el conteo de los mismos y el peso total de la muestra, y su correspondiente porcentaje de humedad.

3.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados fueron analizados con el software estadístico “INFOSTAT” versión 2010. Se realizaron análisis de varianzas para todas las variables estudiadas, las medias se compararon por el test de Tukey al 5% de significancia.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS EN EL PERÍODO DEL CULTIVO

4.1.1 Precipitaciones

La situación climática de la primavera y el verano del año agrícola 2009-10 fue particular y caracterizada por excesos de PP y la ocurrencia de eventos climáticos extremos que incluyeron vientos fuertes. En la figura 1 se presentan las PP mensuales del período en el que se realizó el experimento y los valores promedio durante la serie comprendida entre 1961 y 2009, registrados en Paysandú.

Se observa en la figura 1 que las PP en el período considerado fueron excepcionalmente superiores a las ocurridas en la serie histórica indicada, provocando excesos hídricos durante el ciclo del cultivo. Si consideramos los meses de octubre hasta abril las lluvias ocurridas superan en 56% a las registradas durante el mismo lapso de tiempo en la serie indicada.

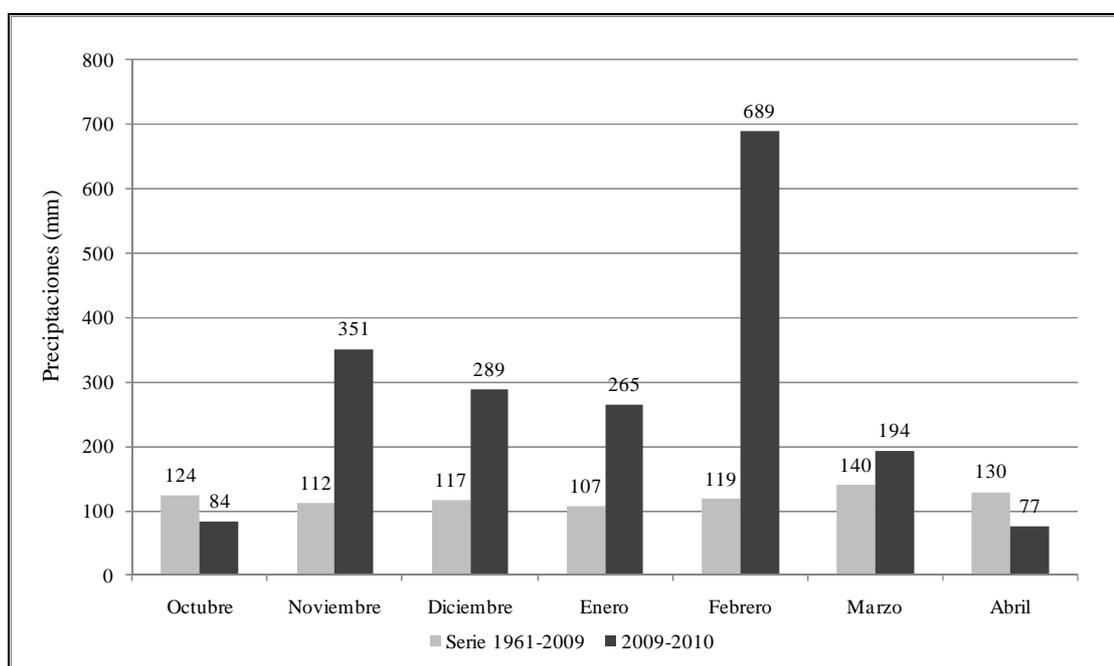


Figura No. 1: Precipitaciones ocurridas durante 2009-2010 obtenida en la estación meteorológica de la EEMAC, Facultad de Agronomía y valores promedio de la serie histórica 1961 a 2009. (elaborado en base a datos proporcionados por la Dirección Nacional de Meteorología).

La primavera y el verano 2009-10 se caracterizaron por la presencia del fenómeno conocido como “El Niño”, las PP superaron en 600 mm a las ocurridas en mismo período del año 1997-98, también caracterizado como año “Niño”. Esto demuestra las particulares condiciones climáticas del año en el que se desarrolló el ensayo, dichas condiciones dificultaron la correcta aplicación de la metodología experimental.

En la figura 2 se puede observar el régimen pluviométrico durante el ciclo del cultivo, se destaca particularmente el mes de febrero ya que las PP superaron a las registradas en la serie histórica en 570 mm. Este mes coincide con la ubicación temporal de una parte importante del PC de determinación del rendimiento o sea las etapas entre R4 y R6 (Kantolic, 2003b), el mismo se extendió desde el 10 de febrero al 10 de marzo.

Las PP totales en el ciclo fueron de 1.377 mm, destacándose que el 25% de los días registraron lluvias, reduciendo notoriamente la radiación solar incidente.

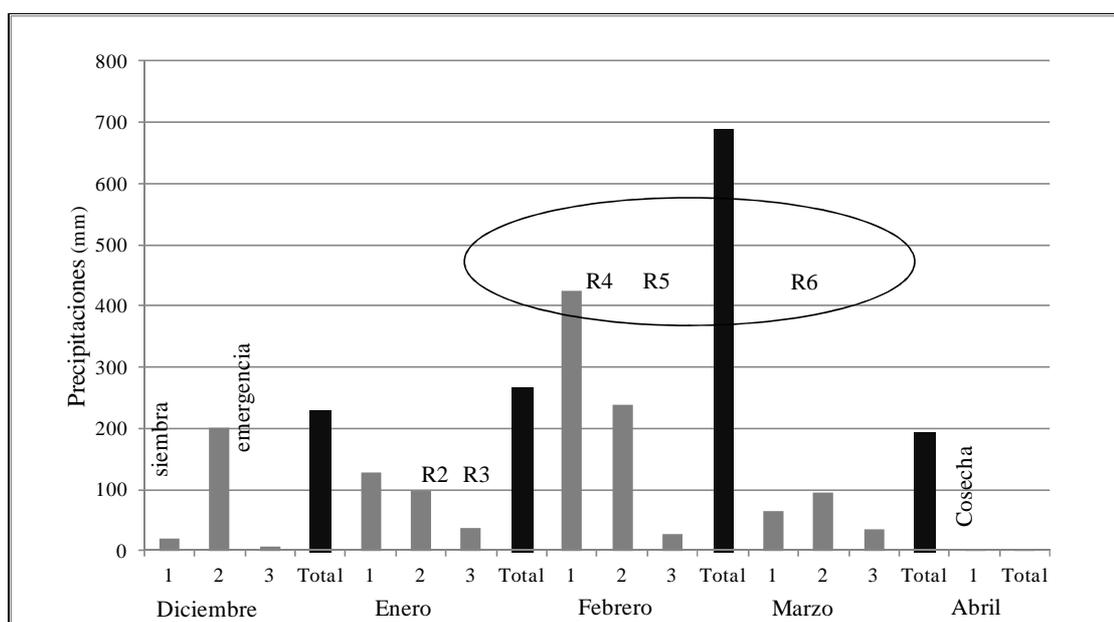


Figura No. 2: Precipitaciones durante el ciclo del cultivo y ubicación de los principales eventos fenológicos.

4.1.2. Radiación solar incidente

Cabe resaltar el impacto de las condiciones descritas anteriormente sobre la radiación solar incidente durante el experimento. En la figura 3 se presenta la radiación media diaria mensual durante el periodo del experimento y el promedio de la serie histórica 1969-2009.

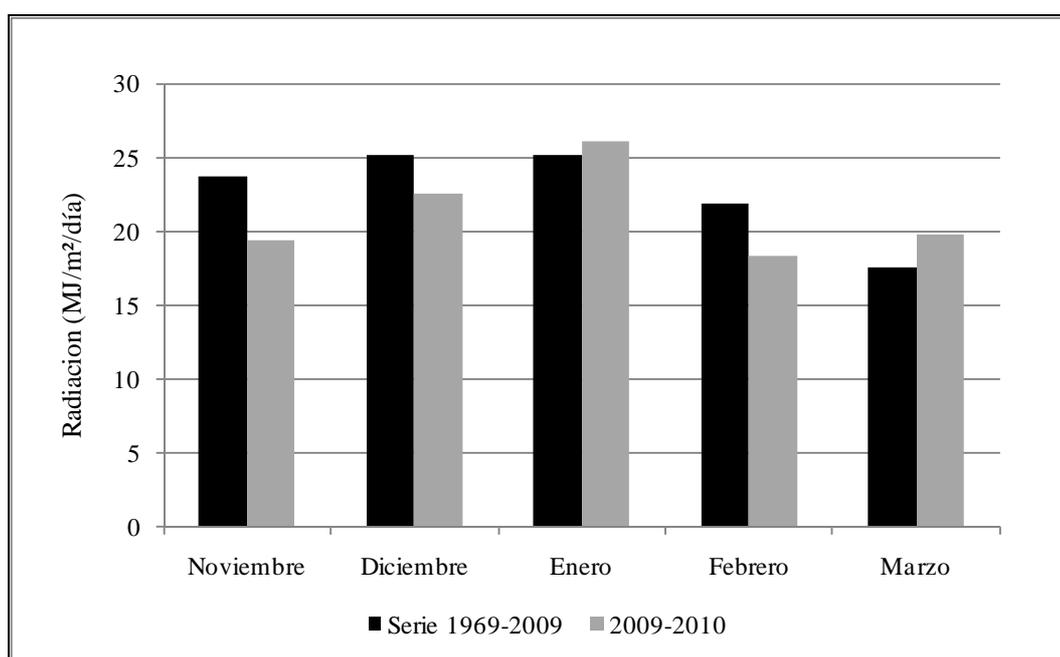


Figura No. 3: Radiación solar expresada en $\text{MJ/m}^2/\text{día}^{-1}$, para la serie histórica (1969-2009) y en el verano 2009-2010 obtenida en la estación meteorológica de la EEMAC, Facultad de Agronomía. La serie histórica en base a Abal et al. (2010).

La radiación solar durante el ciclo de crecimiento del cultivo presentó valores inferiores a los registrados en la serie histórica utilizada como referencia en la mayoría de los meses, excepto durante enero en que la radiación solar incidente fue levemente superior en 2010, coincidiendo con las etapas de desarrollo vegetativo e inicios de la fase reproductiva.

El mes de febrero de 2010 fue el mes que presentó mayores registros pluviométricos y mayor número de días nublados en el ciclo. Esto implicó que la radiación incidente diaria promedio fuera $3,5 \text{ MJ/m}^2/\text{día}^{-1}$ inferior a la serie considerada, coincidiendo dicha disminución con el inicio del desarrollo de las etapas más críticas en la determinación del rendimiento.

4.2. DESCRIPCION DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO

4.2.1. Evolución del agua disponible en el suelo

En las figuras 4, 5 y 6 se muestra la evolución del AD en los tratamientos evaluados de acuerdo al Balance Hídrico. En las figuras se destaca que el contenido hídrico del suelo durante la etapa vegetativa y las primeras etapas reproductivas, fue similar en los tres tratamientos y sin la ocurrencia de deficiencias hídricas debido a las condiciones climáticas particulares del período en el cual se llevó a cabo el experimento.

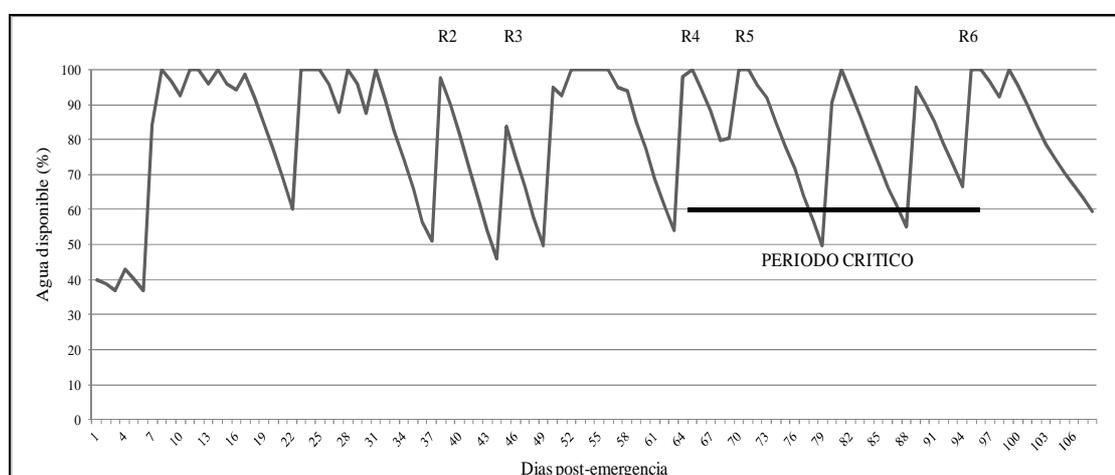


Figura No. 4: Evolución del agua disponible (AD) en el T1.

En la figura 4, se muestra que el AD en el T1 fue mayor a 60% en todo el PC, además de ser el tratamiento que presentó menor dispersión en el contenido hídrico del suelo a lo largo del ensayo.

En el T1 durante todo el ciclo el contenido hídrico del suelo fue elevado y sin restricciones para el crecimiento y desarrollo del cultivo ya que superó el 50% de AD valor considerado como limitante (Andriani, 2002). En el mismo sentido Caraballo (1990), reporta umbrales de bienestar hídrico de 40 a 50% de AD durante los períodos menos sensibles y de 60 % durante el PC.

La ocurrencia de deficiencias hídricas determina reducciones en la TCC ocasionadas por el cierre de los estomas para reducir la pérdida de agua a través de la disminución de la transpiración, limitando de esta forma el intercambio gaseoso a nivel estomático, lo cual impide la fijación normal del CO₂ afectando negativamente el crecimiento. En el caso de que la disponibilidad de agua en suelo en el PC, no alcance un determinado umbral de AD el rendimiento se ve afectado negativamente.

En la figura 5 se observa el AD en el tratamiento en el que se controló la disponibilidad hídrica mediante el uso de simuladores de sequía durante PC.

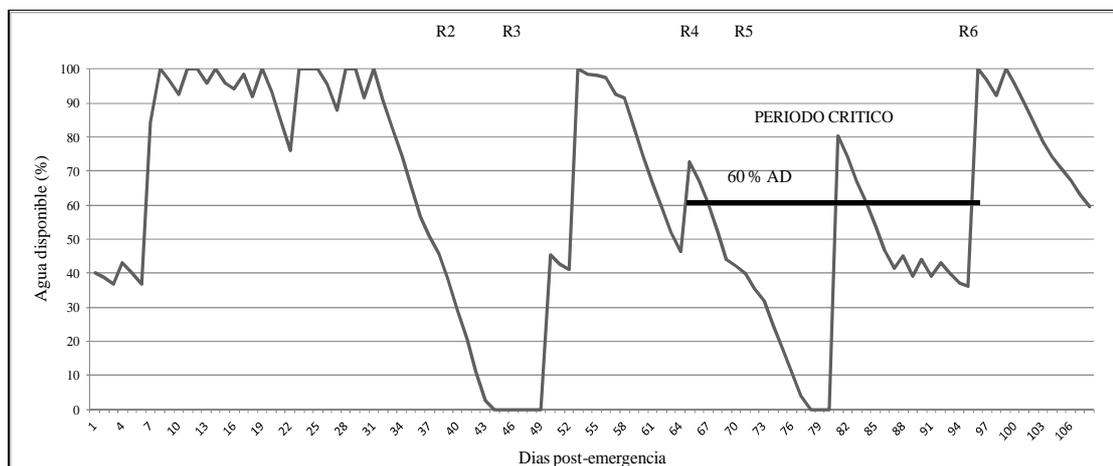


Figura No. 5: Evolución del agua disponible (AD) en el T2.

Se aprecia que durante R3 previo al PC, el AD presentó niveles muy bajos, limitando el crecimiento del cultivo. Es importante aclarar que la metodología utilizada para la realización del balance hídrico sobrestima las pérdidas, ya que este método estima adecuadamente el contenido de AD en situaciones sin deficiencias hídricas.

Según Dardanelli et al. (2002), cuando el contenido hídrico del suelo se ubica entre 40-60% de agua útil se reduce el crecimiento. Además durante el PC la sensibilidad a la falta de agua es mayor que en otras etapas y el potencial de compensación disminuye, debido a una mayor competencia por fotoasimilados entre las estructuras reproductivas de diferente grado de desarrollo existentes en la planta (Andriani 2002, Kantolic 2003b, Karam et al. 2005).

Se observa en la figura 5 que a partir de R6 el AD se incrementa ubicándose por encima del 60%, este aumento no se traduce en mayor rendimiento ya que el mismo se definió en etapas previas.

En la figura 6 se muestra la evolución del AD en el tratamiento de secano.

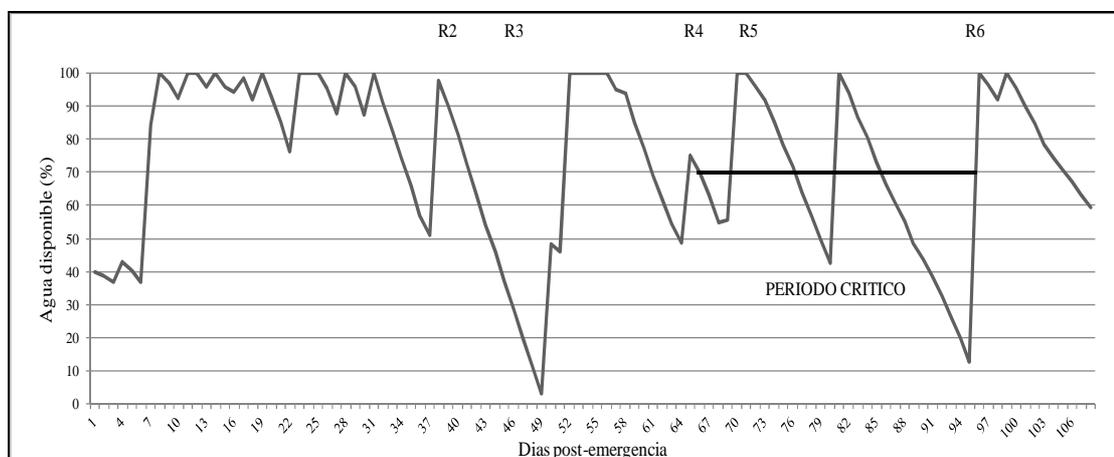


Figura No. 6: Evolución del agua disponible (AD) en el T3.

El T3 fue el tratamiento que presentó mayor dispersión en el contenido de agua a lo largo del ciclo, ya que en el mismo no se controló la disponibilidad hídrica. Dadas las características particulares del año, el volumen de agua almacenada en el suelo fue en gran parte del ciclo no limitante para el crecimiento del cultivo. Sin embargo se aprecia que hubo momentos en el ciclo en que la recarga de agua fue limitante, debido a la baja capacidad de almacenaje del suelo y en especial a la intensidad de las PP que posiblemente hayan superado la tasa de infiltración del suelo, aumentando las pérdidas por escurrimiento el cual no es considerado mediante el BH.

4.2.2. Parámetros de crecimiento

4.2.2.1. Evolución de la MS durante el período crítico

En la figura 7 se muestra la evolución de la MS durante el período comprendido entre los estadios R3 a R6 y la incidencia de la disponibilidad hídrica sobre la acumulación de la MS.

De acuerdo a lo reportado por Dardanelli et al. (2003), la producción de biomasa aérea en soja varía entre 5.400 y 10.800 kg.ha⁻¹, mientras que Andrade et al. (2000), reportaron una producción de biomasa total acumulada que osciló entre 7.400 y 9.600 kg.ha⁻¹ en trabajos realizados en Balcarce, Argentina.

Las diferencias entre la información reportada por los autores citados y la presentada en la figura 7, responden a la influencia que ejercen diversos factores ambientales y genéticos sobre la producción de MS. Los factores inherentes a cada región y características del cultivo como grupo de madurez afectan la fotosíntesis y la transpiración y por ende la producción de biomasa (Otegui, 2009).

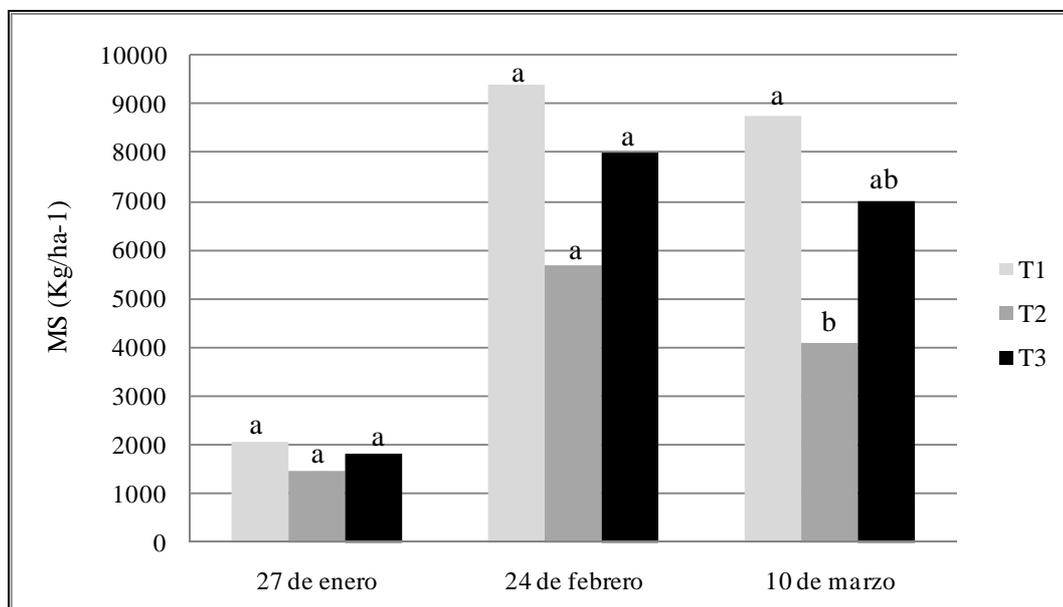


Figura No. 7: MS acumulada en tres momentos del ciclo para los tratamientos evaluados. Valores seguidos de igual letra no difieren entre sí para una misma fecha de muestreo ($p < 0.05$; Tukey).

En el primer muestreo efectuado cuando el cultivo se encontraba en el estadio R3, se observa en la figura 7 una deposición de MS similar entre los tratamientos evaluados ya que la disponibilidad hídrica en la fase vegetativa e inicio de la reproductiva fue alta y similar entre ellos sin diferencias significativas.

En el segundo muestreo de MS efectuado en el estadio R5 no se registran diferencias significativas entre los diferentes tratamientos, esto se explica por la alta variabilidad dentro de los tratamientos en dicho momento. No obstante la deposición de MS en el T2 fue 39% menor que en el T1 como se aprecia en la figura 7. La menor acumulación de MS del T2 es consecuencia de una baja TCC durante la etapa de mayor sensibilidad frente a un estrés.

En el último muestreo realizado previo al estadio R6, se observa una menor deposición de MS respecto al muestreo anterior. Este comportamiento se debe a la característica natural que presenta la especie de desprendimiento de hojas en etapas previas a la madurez fisiológica. Asimismo se observa una mayor diferencia en la acumulación de MS entre T1 y T2 que representa un 53% menos de acumulación entre los tratamientos señalados con diferencias significativas.

Estos resultados superan a los obtenidos por dos Santos (2007), que señaló un aumento del 26% en la acumulación de MS debido a la aplicación de riego en

condiciones subtropicales húmedas. Mientras que Dogan et al. (2007), obtuvieron una reducción del 40% en la producción de biomasa induciendo déficit hídrico en R6.

La reducción en la acumulación de MS durante el muestreo previo al final del PC entre T1 y T2 puede ser atribuida a una menor intercepción de radiación, como también a una menor eficiencia de conversión por consecuencia de la baja disponibilidad hídrica. El crecimiento se reduce cuando el contenido de AD es inferior a 40% (Shaw, Muchow y Sinclair, Dardanelli et al., citados por Andrade y Sadras, 2000). Otra posible causa de menor magnitud en la reducción de la producción de biomasa es el acortamiento de las diferentes etapas fenológicas (Desclaux y Roumet, 1996) y la aceleración de la senescencia (Desclaux y Roumet 1996, Karam et al. 2005), por efecto del estrés.

Cabe señalar que en el T3 la deposición de MS fue similar a la del T1, debido a las condiciones hídricas particulares del período las que fueron expresadas anteriormente.

Cuadro No. 3: Evolución de la biomasa entre R5 y R6

Estado	Tratamientos		
	T1	T2	T3
R5	9387 a	5682 a	8002 a
R6	8768 a	4111 b	6982 a

Valores seguidos de igual letra no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).

En el cuadro 3 se observa la pérdida de biomasa en los tres tratamientos, sin embargo el único tratamiento que presenta diferencias significativas entre los dos momentos de muestreo es el T2. Este comportamiento es atribuido a las deficiencias hídricas provocadas durante el PC, ocasionando una reducción en la intercepción de radiación solar, y reduciendo también la eficiencia de conversión. Otro factor considerado como posible explicación es el aumento en la senescencia foliar debido al estrés hídrico (Desclaux y Roumet, 1996).

4.2.2.2. Efecto de la disponibilidad hídrica sobre la TCC durante R3-R5

En la figura 8 se muestra la TCC entre los estadios fenológicos R3-R5 en los diferentes tratamientos evaluados.

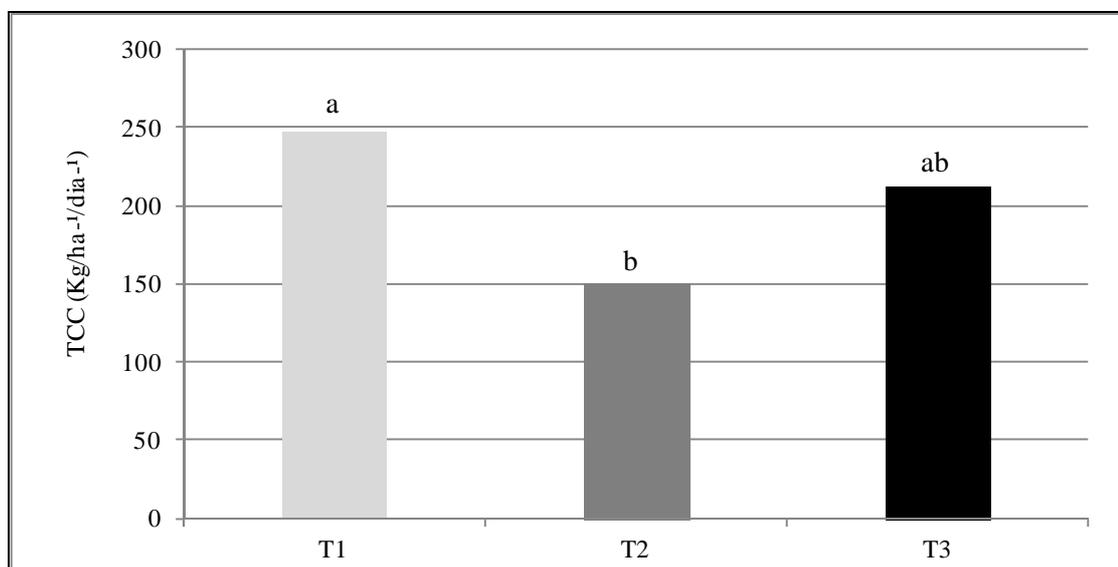


Figura No. 8: Tasa de crecimiento del cultivo durante R3-R5 en los tres tratamientos evaluados. Valores seguidos de igual letra no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).

La disminución en la TCC del T2 durante R3-R5 con respecto al T1 fue de 39%, similar a lo reportado por Andriani et al., Otegui, citados por Andrade y Sadras (2000), donde obtuvo una reducción de 30% en la TCC cuando indujeron deficiencias hídricas durante R4-R6. Además Egli y Yu (1991), Egli y Bruening (1999), Frederick et al. (2001), Oya et al. (2004), reportaron que las TCC entre R1 y R5 son directamente proporcionales al No. de granos a cosecha, concordando con los resultados obtenidos donde la menor TCC del T2 resultó en una menor fijación de granos.

El crecimiento vegetativo se prolonga hasta R5 en cultivares de soja de crecimiento indeterminado como el estudiado, esta superposición de estadios genera competencia por fotoasimilados entre las estructuras vegetativas y las reproductivas con diferentes grados de desarrollo. Por lo tanto, eliminando factores que reduzcan la TCC durante este período se maximizaría la fijación de granos por unidad de área, ya que este componente es el resultado de la fotosíntesis producida entre las etapas floración (R1-R2) y fijación de granos (R3-R6). El T1 registró la mayor TCC obtenida en el experimento siendo significativamente superior a la obtenida en el T2, influyendo en el No. de granos fijados.

4.2.3. Efecto de la disponibilidad hídrica sobre el rendimiento

En la figura 9 se muestran las diferencias en rendimiento entre los tratamientos evaluados. Se destacan las obtenidas entre el T1 y el T2 por efecto de las deficiencias hídricas provocadas en el T2 durante el PC.

Si bien el rendimiento del T1 es muy alto comparado con los rendimientos obtenidos a nivel comercial, existen antecedentes a nivel experimental que reportan $6.200 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en secano en un año óptimo en distribución y volumen de las PP (Bonjour et al., 2010). Esto refleja que el rendimiento comercial está muy distante del rendimiento potencial de la especie en condiciones de riego.

La limitante ambiental considerada en el T1 por la que no se logró expresar un mayor rendimiento, fue el elevado número de días nublados esto provocó una reducción de la radiación solar incidente como ya fue señalado en la figura 3.

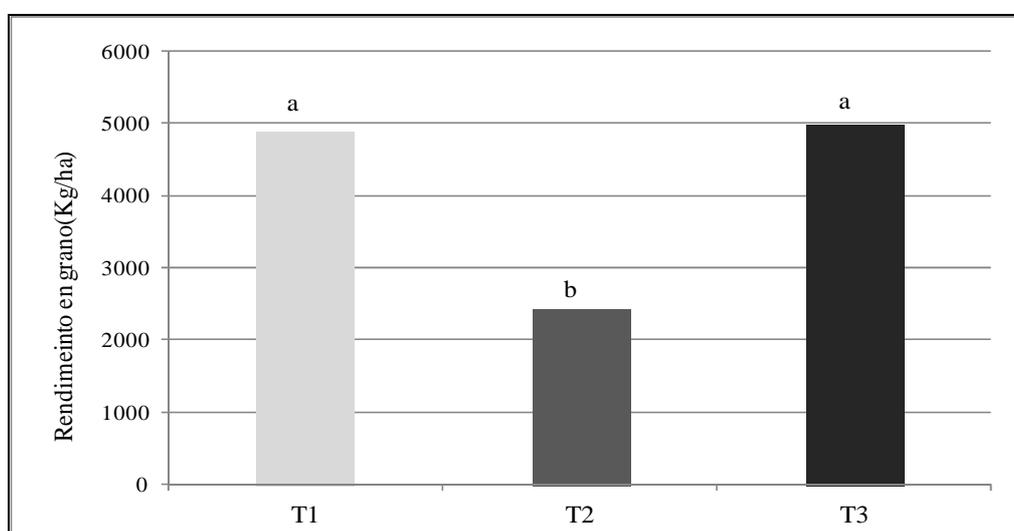


Figura No. 9: Rendimiento en grano ($\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), en los diferentes tratamientos. Valores seguidos de igual letra no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).

La disminución del rendimiento en el T2 con respecto al T1 fue de 50% por efecto de las deficiencias hídricas provocadas durante el PC, superando el 30% de pérdida reportado por Dogan et al. (2007), que obtuvo un rendimiento máximo de $3.952 \text{ Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Sincik et al. (2008), reportaron que la falta de riego redujo 45% el rendimiento comparado con el tratamiento donde se regó durante todo el ciclo, el rendimiento máximo que alcanzaron estos autores fue de $3.700 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Como reportan Sionit y Kramer (1977), Andrade y Sadras (2000), Kantolic (2003b), Karam et al. (2005), Dogan et al. (2007), las mayores pérdidas de rendimiento se producen cuando la disponibilidad hídrica es limitante durante el PC. Los resultados obtenidos reafirman que si la disponibilidad hídrica es limitante durante el PC, se producen importantes pérdidas en el rendimiento, concordando con lo reportado por estos autores.

El rendimiento obtenido en el T3 es explicado por las PP acumuladas durante el período R3-R6 que fueron 885 mm. Estas condiciones particulares son de muy baja repetibilidad de acuerdo a las series históricas analizadas.

4.2.3.1. Relación entre rendimiento y sus componentes

Se puede apreciar en la figura 10 (a) que el No. de granos. m^{-2} es el principal determinante de la variación del rendimiento, por el contrario el peso de mil granos presentó una baja correlación con el rendimiento.

El componente peso de mil granos presentó en este ensayo un peso promedio de 197 g, lo que representa un valor elevado si tomamos en cuenta el peso de mil granos señalado en la descripción del cultivar el cual es de 171 g (Arias y De Battista, 2009).

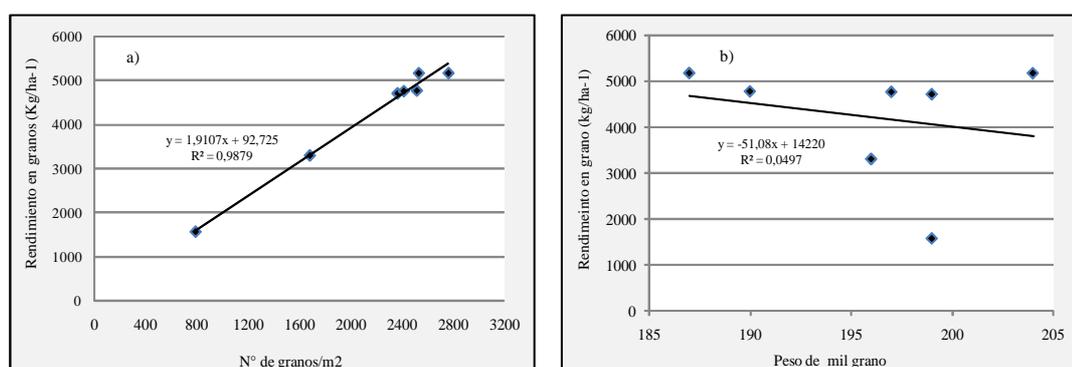


Figura No. 10: Rendimiento en función del No. de granos. m^{-2} (a) y el peso de 1000 granos (b).

La alta correlación entre No. de granos. m^{-2} y rendimiento obtenido en este experimento, coincide con lo expresado con Eck et al. (1987), Kantolic (2003b), Kantolic y Satorre (2004), Board y Modali (2004), Modali (2004), Baroffio y Ramos (2009), Bonjour et al. (2010). Esta correlación presentó un $r^2=0.98$ como se aprecia en la figura 10 (a) verificando la solidez de las afirmaciones realizadas.

En la figura 10 (b) se observa que el peso de mil granos y el rendimiento muestran una baja correlación, concordando con lo reportado por Kantolic et al. (2003b), Board y Modali (2004), Kantolic y Satorre (2004), Bonjour et al. (2010).

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

Cuadro No. 4: Componentes del rendimiento para las tres disponibilidades hídricas

Tratamientos	Componentes del rendimiento	
	Número de granos.m ²	Peso de 1000 granos
T1	2473 a	197 a
T2	1237 b	197 a
T3	2591 a	192 a

Valores seguidos de igual letra no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).

Para el componente No. de granos.m⁻² se hallaron diferencias significativas entre el T1 y T2, no así para el peso de los 1000 granos. Desclaux et al. (2000), reportaron resultados semejantes en que el No. de granos fue el componente más afectado cuando el estrés se ubicó durante el alargamiento de vainas.

Las deficiencias hídricas durante el PC provocaron una reducción de 50 % en el No. de granos por unidad de superficie en el T2 en comparación con el T1. Este valor supera al reportado por Andriani et al., citados por Andrade y Sadras (2000), quienes reportaron una disminución de 29%, cuando el consumo de agua se redujo un 50% en comparación con testigos regados en un experimento realizado en Balcarce.

Por lo tanto, el No. de granos fijados fue afectado en respuesta a los diferentes tratamientos que modificaron el crecimiento del cultivo entre R3 y R6 como ya se señaló en la figura 8. La reducción en la fijación de granos explica la pérdida de rendimiento en el T2 ya que la fijación de estos se reduce cuando la TCC no es la adecuada en el PC. Al extenderse el déficit desde R3 hasta R6 como se mostró en la figura 5, no permitió que actuaran los mecanismos de compensación, generando nuevas estructuras reproductivas para fijar nuevos granos y/o aumentar el peso de estos para disminuir pérdidas de rendimiento.

Si bien el resultado obtenido del T1 en No. de granos es elevado como se aprecia en el cuadro 3, es inferior a lo reportado por Bonjour et al. (2010) que obtuvieron 3.100 granos.m⁻². Este comportamiento lo atribuimos a las condiciones del año que redujeron la radiación solar incidente durante el PC, restringiendo la TCC e impidiendo de esta forma la fijación de un mayor No. de granos.

Como se aprecia en el cuadro 3, no se registraron modificaciones significativas en el peso de los granos entre tratamientos, contrariamente a lo señalado por Karam et al. (2005), estos autores reportaron una disminución en el peso de los granos de hasta un 10% provocado por deficiencias hídricas durante R5. En el mismo sentido Dogan et

al. (2007), obtuvieron reducciones significativas en el peso de grano cuando impusieron deficiencias hídricas en R3, R5 y R6.

Estos resultados permiten concluir que el mayor No. de granos.m⁻² a cosecha que presentaron el T1 y el T3 es explicado fundamentalmente por las diferencias en la TCC durante el PC ya que la cantidad de carbohidratos se reduce cuando el cultivo es sometido a deficiencias hídricas. Por lo tanto, toda condición ambiental que estimule la tasa fotosintética y una elevada TCC conducirá a maximizar el No. de granos (Frederick et al. 2001, Kantolic 2003b, Oya et al. 2004).

4.2.4. Evapotranspiración del cultivo y eficiencia en el uso del agua en el T1

En la figura 11 se muestra la evolución de la ETc estimada a lo largo del ciclo de crecimiento en el T1. Cabe señalar que solo fue posible estimar la ETc en dicho tratamiento, debido a que para el cálculo de la ETc bajo condiciones de estrés se debería utilizar factores de corrección que aun no se encuentran disponibles localmente.

La notoria reducción en esta a partir de R3 es consecuencia de la cantidad de eventos de PP registrados hasta R5 que redujeron la demanda atmosférica. El motivo por el cual la ETc no aumenta después de R6, es porque comienza a descender la cobertura del cultivo y por ende el Kc (Della Maggiora et al., 2000).

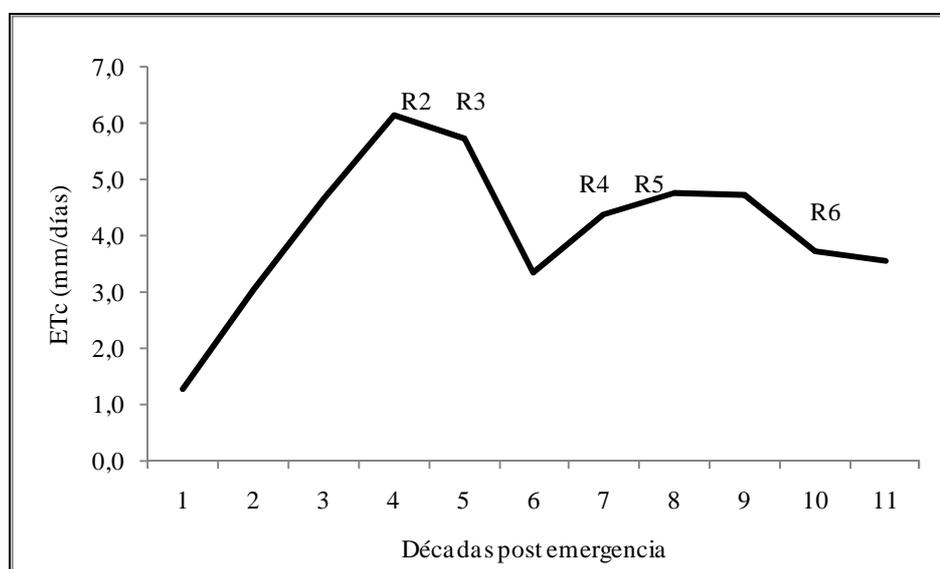


Figura No. 11: Evapotranspiración del cultivo en el T1.

La ETc acumulada para el T1 fue de 435 mm, entre los estadios R4 y R6 la misma fue de 144 mm representando el 33% de la ETc total. Este valor es inferior al evaluado por Karam et al. (2005), los que reportaron que el 65% de la ETc de la soja

ocurre entre los estadios R3 y R5, mostrando la mayor sensibilidad durante este período. La ETc diaria durante el PC fue de 4.5 mm.día^{-1} , esta es más baja que los valores obtenidos por Reicosky y Heatherly, citados por Della Maggiora et al. (2000), Karam et al. (2005), que reportaron una ETc diaria de 7,6 y 5,9 mm.día^{-1} respectivamente. Cabe indicar que la menor ETc estimada se debió a que la siembra del experimento fue tardía, por lo cual el PC se ubicó bajo condiciones de menor demanda atmosférica, asimismo las características particulares del año redujeron aun más el consumo de agua.

A través de la estimación de la ETc del T1 se estimó la EUA para la producción de granos, la cual fue de 11,2 Kg/mm evapotranspirado. Similares resultados fueron reportados por Quaglieta Charandá y Mori, citados por Della Maggiora et al. (2000), superando los reportados por Andrade, citado por Della Maggiora et al. (2000), que obtuvo una EUA de 9,1 Kg/mm. Sincik et al. (2008), reportó valores de 4,58 Kg/mm bajo condiciones no estresantes y con deficiencias hídricas esta aumentó a 5,8 Kg/mm.

Es importante señalar que tanto la ETc como la EUA son características variables, dependientes de las condiciones meteorológicas y ambientales como también a las características propias del crecimiento y desarrollo del material genético (Della Maggiora et al., 2000).

5. CONCLUSIONES

El año en el que se desarrolló el experimento se caracterizó por presentar una primavera y verano con excesos de PP y alta proporción de días nublados debido al fenómeno de “El Niño”, estas condiciones afectaron la correcta aplicación de la metodología experimental. Asimismo esta situación climática generó contenidos hídricos elevados en el suelo y una disminución de la radiación solar durante gran parte del ciclo de desarrollo del cultivo.

Los resultados del ensayo revelan que deficiencias hídricas durante el PC provocan pérdidas de rendimiento en grano del 50%. El tratamiento que no sufrió deficiencias hídricas durante el ciclo presentó un rendimiento de $4.885 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ mientras que el tratamiento con contenidos hídricos en el suelo por debajo de 60% de AD durante el PC mostró un rendimiento en grano de $2.435 \text{ Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

El componente que explicó este comportamiento fue principalmente el No. de granos. m^{-2} , el coeficiente de correlación entre el No. de granos. m^{-2} y el rendimiento fue de 0.98.

Las diferencias en el No. de granos entre los tratamientos con y sin deficiencias hídricas en el PC las atribuimos a la reducción en la TCC durante el PC provocadas por la baja disponibilidad hídrica. La TCC del T1 fue de $248 \text{ Kg MS}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$ la cual permitió fijar $2.473 \text{ granos}\cdot\text{m}^{-2}$ mientras que el T2 fijó un 50% menos de granos con una TCC de $151 \text{ Kg MS}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$.

La mayor acumulación de biomasa del T1 en relación al T2 a R6, es consecuencia de las diferentes TCC durante el PC, por lo tanto la menor disponibilidad hídrica no solo afecta el rendimiento, sino también la acumulación de MS. El periodo de mayor acumulación de MS para los tratamientos evaluados fue durante los estadios de R3 a R5, coincidiendo con la mayor parte del PC.

Los resultados obtenidos permiten concluir que el riego suplementario es una herramienta que reduciría las pérdidas de rendimiento ocasionadas por períodos de deficiencias hídricas. Niveles inferiores al 60% de AD durante el PC originaron una reducción de 2.450 Kg/ha^{-1} del rendimiento potencial.

6. RESUMEN

Fue conducido un experimento en soja en la primavera-verano 2009-2010, induciendo deficiencias hídricas a través de simuladores de sequía en el PC para cuantificar las pérdidas en el rendimiento y sus componentes. Además se evaluó la producción y acumulación de materia seca. Se condujeron tres tratamientos: T1 sin deficiencias hídricas con más de 60% de agua disponible en el período crítico, T2 con deficiencias hídricas durante el período crítico definidas con menos de 60% de agua disponible y T3 en condiciones de secano. Este experimento se llevó a cabo con la variedad DM 5.1 indeterminada y sobre un suelo Brunosol sub-eutrico típico perteneciente a la unidad San Manuel. Las condiciones del experimento produjeron reducciones significativas en rendimiento, en la acumulación de materia seca en R6 y en la tasa de crecimiento del cultivo en el período crítico del T2 con respecto al T1. El T1 logró un rendimiento de 4.885 Kg.ha^{-1} , mientras que el T2 rindió 2.435 Kg.ha^{-1} con una reducción del 50%. El T3 no mostro diferencias significativas con T1 ya que fue un año excepcionalmente lluvioso. El número de granos a cosecha del T1 fue de $2.472 \text{ granos.m}^{-2}$, en cambio el T2 presentó $1.237 \text{ granos.m}^{-2}$ siendo significativamente inferior al T1 y T3. El peso de mil granos fue elevado y similar entre los tres tratamientos con un valor de 197 g para el T1, no encontrándose diferencias significativas entre los tratamientos. La acumulación de materia seca mostró diferencias significativas en R6, la disminución del T2 fue $4.657 \text{ Kg MS.ha}^{-1}$ lo que representa 53% menos de acumulación frente al T1. La tasa de crecimiento del cultivo en el período crítico fue el parámetro que generó las diferencias en los resultados de este experimento por la influencia que ejerce sobre los componentes número de granos y acumulación de materia seca. Los valores registrados para la tasa de crecimiento durante el período crítico fueron $248 \text{ Kg MS.ha}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$, $151 \text{ MS.ha}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$ y $213 \text{ MS.ha}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$ para T1, T2 y T3 respectivamente, registrando solo diferencias significativas entre T1 y T2. Los resultados indican que sin deficiencias hídricas en el período crítico se producen elevados rendimientos en grano, con alta producción de materia seca y alta tasa de crecimiento del cultivo.

Palabras clave: Soja; Contenido hídrico del suelo; Estrés hídrico; Rendimiento en grano; Período crítico.

7. SUMMARY

An experiment was conducted in soybean during the spring-summer 2009-2010, by inducing water deficiency using drought simulators in the PC in order to quantify the losses in yield and its components. The production and accumulation of dry matter was also evaluated. Three treatments were evaluated: T1- without water deficiency, with more than 60% of water available at critical growth stages and more than 40% of water available at non critical growth stages; T2 - water deficiency at critical growth stages defined with less than 60% of available water and more than 40% of water available at critical growth stages; and T3 - in rainfed conditions. This experiment was conducted with the variety DM 5.1 indetermined and over a typical Brunosol sub-eutric soil, belonging to San Manuel's unit. The experiment conditions produced significant yield reductions in dry matter accumulation in R6 and in the crop growth rate during the critical period of T2 compared to T1. The treatment without water deficiency (T1) had the highest yield ($4885 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), while the treatment with water deficiency at critical growth stages (T2) had the lowest yield ($2435 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) with a significant reduction of 50% from T1. T3 did not show significant differences from T1. The grains number at harvest for T1 was $2.472 \text{ grains}\cdot\text{m}^2$, whereas T2 presented $1.237 \text{ grains}\cdot\text{m}^2$, a significantly lower value than T1 and T3. The 1000 seed weight was high and similar among the three treatments with a 197g value for T1, this parameter did not show significant differences between treatments. Dry matter accumulation showed significant differences in R6, the decrease in T2 was 53% ($4657 \text{ Kg MS}\cdot\text{ha}^{-1}$) less accumulation compared to T1. The crop growth rate from R3 to R5 was the parameter that caused the differences in the results of this experiment on the grain number at harvest and dry matter accumulation given the influence it this components. The values registered for crop growth rate from R3 to R5 were 248, 151 y $213 \text{ Kg MS}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{day}^{-1}$ for T1, T2 and T3 respectively, significant differences between T1 and T2 only. The results suggest that without water deficiencies in critical growth stages high grain yields can be achieved, with high dry matter production and high crop growth rates.

Keywords: Soybean; Soil water content; Water stress, Grain yield; Critical growth stages.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. ABAL, G.; D'ANGELO, M.; CATALDO, J.; GUTIERREZ, A. 2010. Mapa solar del Uruguay; memoria técnica. (en línea). Montevideo, Universidad de la Republica. Facultad de Ingeniería. 54 p. Consultado 10 oct. 2011. Disponible en <http://www.fing.edu.uy/if/solar/memoria-mapa-solarv1.pdf>.
2. ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo; guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, FAO. 304 p. (Estudio FAO Riego y Drenaje no. 56).
3. ANDRADE, F. H.; AGUIRREZABAL, L.; RIZZALLI, R. 2000a. Crecimiento y rendimiento comparado. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, EEA INTA Balcarce/ UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 61-96.
4. _____; SADRAS, V. O. 2000b. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, EEA INTA Balcarce/ UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 173-206.
5. ANDRIANI, J. M. 2002. Estrés hídrico en soja. Revista IDIA XXI. 3: 48-51.
6. ARIAS, N.; DE BATTISTA, J.J. 2009. Evaluación de cultivares de soja. Resultados 2008/09. (en línea). Concepción del Uruguay, INTA. 26 p. Consultado 28 may. 2011. Disponible en <http://www.inta.gov.ar/concepcion/informacion/documentos/oleaginosa/soja/09/Evaluacion-de-cultivares-de-soja-08-09.pdf>.
7. ASHLEY, D. A.; ETHRIDGE, W. J. 1978. Irrigation effects on vegetative and reproductive development of three soybean cultivars. Agronomy Journal. 70: 467-471.
8. BAETHGEN, W. E.; TERRA, R. 2010. El riego en un clima cambiante. In: Seminario Internacional Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (1º, 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 7-18.
9. BAIGORRI, H. 1997. Elección de cultivares. In: Giorda, L.; Baigorri, H.E. eds. El cultivo de la soja en Argentina. Córdoba, Argentina, INTA CR. pp. 102-105.

10. BAROFFIO, J.C.; RAMOS, J.P. 2009. Calibración y validación del modelo cropsyst para un cultivar de soja para las condiciones de producción del litoral-oeste de Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 69 p.
11. BLUM, A.; NARBONDO, I.; OYHANTCABAL, G.; SANCHO, D. 2008. Soja transgénica y sus impactos en Uruguay; la nueva colonización. Montevideo, Uruguay, s.e. 194 p.
12. BOARD, J.E.; MODALI, H. 2004. Dry matter accumulation predictors for optimal yield in soybean. *Crops Science*. 45: 1790-1799.
13. BONJOUR, I.; BONILLA, F.; CLARAMUNT, J.A. 2010. Producción de forraje y grano de soja (*Glycine max.*) bajo pastoreo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 100 p.
14. BREVEDAN, R.E.; EGLI, D.B. 2003. Short periods of water stress during seed filling, leaf senescence, and yield of soybean. *Crop Science*. 43: 2083-2088.
15. CARABALLO, L. 1990. Manejo del riego en soya sembrada en suelo arenosos de la mesa de Guanipa. *Agronomía Tropical*. 40: 35-56.
16. CASTAÑO, J.P.; CERONI, M.; GIMÉNEZ, A.; FUREST, J.; AUNCHAYNA, R. 2010. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009. (en línea). Montevideo, INIA. 28 p. Consultado 5 may. 2011. Disponible en <http://www.inia.org.uy/gras/agroclima/cara-agro/index.html>
17. CORSI, W.C. 1982. Regionalización agroclimática de Uruguay para cultivos. Estación Experimental Agropecuaria La Estanzuela. C.I.A.A.B. Miscelánea 40. 29 p.
18. DARDANELLI, J; COLLINO, D.; OTEGUI, M.E; SADRAS, V.O. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de granos. *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. pp. 377-406.
19. DELLA MAGGIORA, A.I.; GARDIOL, J.M.; IRIGOYEN, A.I. 2000. Requerimientos hídricos. *In*: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, EEA INTA Balcarce/ UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 155-171.

20. DESCLAUX, D.; ROUMET, P. 1996. Impact of drought stress on the phenology of two soybean (*Glycine max* L. Merr) cultivars. *Field Crops Research*. no. 46: 61-70.
21. _____; HUYNH, T.T.; ROUMET, P. 2000. Identification of soybean plant characteristics that indicate the timing of drought stress. *Crop Science*. 40(3): 716-722.
22. 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.
23. DOS SANTOS GOMEZ, A.C. 2007. Efeito de diferentes estratégias de irrigação sob a cultura de soja (*Glycine max* (L.)Merrill) na região de Santiago, RS. Dissertação de mestrado. Santa Maria, RS, Brasil. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS). 133 p.
24. DURÁN, A.; CALIFRA, A.; MOLFINO, J. H.1999. Suelos del Uruguay según soil taxonomy. (en línea). Montevideo, MGAP. 14 p. Consultado 5 abr. 2011. Disponible en [http://www.mgap.gub.uy/renare/SuelosyAguas/ Estudios Basico de Suelos/Informacion Suelos Uruguay.pdf](http://www.mgap.gub.uy/renare/SuelosyAguas/EstudiosBasico de Suelos/Informacion Suelos Uruguay.pdf).
25. ECK, H.V.; MATHERS, A.C.; MUSICK, J.T. 1987. Plants water stress at various growths stages and growth and yield of soybean. *Field Crops Research*. 17: 1-16.
26. EGLI, D.B.; YU, Z.W. 1991. Crop growth rate and seeds per unit area in soybean. *Crops Science*. 31: 439-442.
27. _____; BRUENING, W. P. 1999. Potential of early-maturing soybean cultivars in late plantings. *Agronomy Journal*. 11: 532-537.
28. 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 (1º, 2009 Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Paysandú, Uruguay, Facultad de Agronomía. Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni. pp. 33-48.
29. FEHR, W.R.; CAVINESS, C. E.; BURMOOD, D.T.; PENNINGTON, J. S. 1971. Stage development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Grain yield response to drought depends on the tim- Merrill. *Crop Science*. 11: 929-931.

30. FREDERICK, J.R.; BAUER, P.J.; CAMP, C. 2001. Drought-stress effects on branch and mainstem seed yield and yield components of determinate soybean. *Crop Science*. 41: 759-763.
31. FREIXAS, J.A.; REYNALDO I. M.; NÁPOLES, M.C. 2010. Influencia de la sequía sobre el metabolismo del nitrógeno fijado durante la simbiosis *Bradyrhizobium*- soya. *Cultivos Tropicales*. 31(2): 66-73.
32. GARCIA, F.O. 2009. Introducción; marco de referencia del Simposio. In: Simposio Nacional de Agricultura de Secano (1°, 2009 Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Paysandú, Uruguay, Facultad de Agronomía. Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni. pp. 3-5.
33. GARCÍA PRÉCHAC, F.; DURÁN, A.; CALIFRA, A.; HILL, M. s.f. Propiedades hídricas de los suelos. Montevideo, Facultad de Agronomía. 89 p.
34. GENTA, J. L.; TEIXEIRA, L. 2001. Inundaciones y drenaje urbano – Uruguay. In: TUCCI, C. E. M.; Bertoni J. C. eds. Inundações urbanas na América do Sul. Porto Alegre, Brasil, Asociación Brasileira de Recursos Hídricos. p. irr.
35. GIMÉNEZ, L. 2004. Potencial de rendimiento de maíz para grano. *Cangüé*. no. 26: 33-38.
36. _____. 2007a. Comportamiento fenológico de diferentes grupos de madurez de soja (*Glicine max*) en Uruguay. Ubicación temporal del período crítico. *Agrociencia*.11: 1-9.
37. _____. 2007b. Estudio de la disponibilidad hídrica en cultivos de verano en el litoral. In: Seminario Técnico Importancia del Agua en el Actual Escenario Agrícola (1°, 2007, Paysandú). Trabajos presentados. Posibilidades de aplicación de riego suplementario. Paysandú, Uruguay, Facultad de Agronomía. Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni. p.irr.
38. _____.; GARCIA PETILLO, M. 2009. Estudio de las necesidades hídricas de los cultivos de verano en Uruguay. In: Simposio Nacional de Agricultura de Secano. (1°, 2009 Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Paysandú, Uruguay, Facultad de Agronomía. Estación Experimental Dr. Mario Cassinoni. pp. 17-32.
39. HERNÁNDEZ, J. J.; OSORES, J. I. 2007. Efecto del manejo del barbecho invernal sobre los requerimientos de nitrógeno de maíz (*Zea mays*) sembrado en sistemas de agricultura continua en siembra directa. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. 82 p.

40. KANTOLIC, G.; GIMÉNEZ, P.I.; DE LA FUENTE, E.B. 2003a. 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. pp. 167-186.
41. _____. 2003b. Ecofisiología del cultivo de soja; bases para el manejo y para el aumento del rendimiento potencial. In: Reunión de Actualización en soja (2°, 2003, Criadero Don Mario). Trabajos presentados. Buenos Aires, Facultad de Agronomía. Cátedra de Cultivos Industriales. Departamento de Producción Vegetal. p. irr.
42. _____.; SATORRE, E. H. 2004. Elementos centrales de ecofisiología del cultivo de soja. In: Díaz-Zorita, M.; Duarte, G.A. eds. Manual práctico para la producción de soja. Buenos Aires, Hemisferio Sur. pp. 1-37.
43. KARAM, R. M.; 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.
44. KOKUBUN, M.; SHIMADA, S.; TAKAHASHI, M. 2001. Flower abortion caused by preanthesis water deficit is not attributed to impairment of pollen in soybean. *Crop Science*. 41: 1517-1521.
45. MANDL, A. 2000. Variabilidad de los rendimientos en soja. *Agrociencia*. 4: 12-16.
46. MIRALLES, D.J.; WINDAUER, L.B.; GOMEZ, N.V. 2003. Factores que regulan el desarrollo de los cultivos de granos. 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. pp. 61-71.
47. MODALI, H. 2004. Dry matter accumulation by the start of seed filling as a criterion for yield optimization in soybean. *Agronomy Journal*. 88: 123-131.
48. MOLFINO, J.H.; CALIFRA, A. 2001. Agua disponible de las tierras del Uruguay - Segunda Aproximación. (en línea). Montevideo, MGAP. División Suelos y Aguas. Dirección de Recursos Naturales Renovables. 12 p. Consultado 4 abr. 2011. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/renare>

49. NIELSEN, D.C.; MA, L.; LAJPAT, R.; AHUJA, L.R.; HOOGENBOOM, G. 2002. Simulating soybean water stress effects with RZWQM and CROPGRO models. *Agronomy Journal*. 94: 1234-1243.
50. OTEGUI, M. E. 2009. Bases ecofisiológicas para el manejo del agua en cultivos para grano conducidos en secano. *In*: Simposio Nacional de Agricultura de Secano (1º, 2009 Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Paysandú, Uruguay, Facultad de Agronomía. Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni. pp. 7- 16.
51. OYA, T.; LIMA NEPOMUCENO, A.; NEUMAIER, N.; BOUÇAS FARIAS, J. R.; TOBITA, S.; ITO, O. 2004. Drought tolerance characteristic of brazilian soybean cultivar; Evaluation and characterization of drought tolerance of various brazilian soybean cultivars in the field. *Plant Production Science*. 7: 129-137.
52. RANDALL, P.W; DENISON, R.F y SINCLAIR, T.H. 1984. Response to drought stress of nitrogen fixation (acetylene reduction) rates by field-grown soybeans. *Plant Physiology*. 78: 525-530.
53. SADRAS, V.O.; FERREIRO, M.; GUTHEIM, F.; KANTOLIC, A. 2000. Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperiodo. *In*: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, EEA INTA Balcarce/ UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 29-60.
54. _____; CALVIÑO, P.A. 2001. Quantification of grain yield response to soil depth in soybean, maize, sunflower, and wheat. *Agronomy Journal*. 93: 577-583.
55. SALINAS, A.R.; ZELENER, N.; CRAVITTO, R.M.; BISARO, V. 1996. Respuestas fisiológicas que caracterizan el comportamiento de diferentes cultivares de soja a la deficiencia hídrica en el suelo. EMBRAPA. *Revista Agropecuaria Brasileira (PAB)*. 31(5): 331-339.
56. SAWCHIK, J. 2000. Algunos conceptos básicos para el manejo del riego. (en línea). Montevideo, INIA. s.p. Consultado 3 mar. 2011. Disponible en http://www.inia.org.uy/disciplinas/agroclima/publicaciones/rec_nat.

57. _____.; CERETTA, S. 2005. Consumo de agua por sojas de distintos grupos de madurez en diferentes ambientes de producción. (en línea). Montevideo, INIA. pp. 41-51. Consultado 15 set. 2011. Disponible en http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/le/ad/2005/ad_417.pdf.
58. SERRAJ, R.; SINCLAIR, T. R.; ALLEN, H. 1998. Soybean nodulation and N₂ fixation response to drought under carbon dioxide enrichment. *Plant Cell and Environment*. 21: 491-500.
59. _____.; _____.; PURCELL, L. 1999. Symbiotic N₂ fixation response to drought. *Journal of Experimental Botany*. 50 (331): 143–155.
60. SHURTLEFF, W.; AOYAGI, A. 2009. History of soybeans and soyfoods in south america (1882-2009); extensively annotated bibliography and sourcebook. Lafayette, USA, Soyinfo Center. pp. 1-15.
61. SINCİK, M.; CANDOGAN, B. N.; DEMIRTAS, C.; BUYUKCANGAZ, H.; YAZGAN, S.; GOKSOY, A.T. 2008. Deficit irrigation of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] in a sub-humid climate. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 194(3): 200-205.
62. SIONIT, K.; KRAMER, P. J. 1977. Effect of water stress during different stages of growth of soybean. *Agronomy Journal*. 69: 274–278.
63. TERRA, R.; PISCIOTTANO, G. 1994. Regionalización del Uruguay según ciclo anual de precipitaciones mediante “Cluster Analysis”. Montevideo, Uruguay, Universidad de la Republica. p. irr.
64. THOMAS, A.L.; COSTA, J.A. 1994. Influencia do déficit hídrico sobre o desenvolvimento e rendimento da soja. EMBRAPA. *Revista Agropecuaria Brasileira* (PAB). 29(9): 1389-1396.
65. URUGUAY. MINISTERIO DE DEFENSA NACIONAL. DIRECCIÓN NACIONAL DE METEOROLOGÍA. 2011. Características climáticas. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 7 may. 2011. Disponible en <http://www.meteorologia.gub.uy>
66. _____. MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA. DIRECCIÓN DE INVESTIGACIONES ECONÓMICAS AGROPECUARIAS. 2007. Anuario 2007. Oleaginosos y derivados; situación y perspectivas. Montevideo. pp. 141-151.

67. _____. _____. _____. 2009. Encuesta agrícola “Primavera 2009”. (en línea). Montevideo. 32 p. Consultado 10 mar. 2011. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/portal/hgxpp001.aspx>.
68. _____. _____. _____. 2010. Encuesta agrícola “Invierno 2010”. (en línea). Montevideo. 33 p. Consultado 10 oct. 2011. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/portal/hgxpp001.aspx>.
69. _____. _____. _____. 2011. Un siglo de agricultura (en línea). Montevideo. 4 p. Consultado 30 de oct. 2011. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/portal/hgxpp001.aspx>.