

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EFFECTO DEL GRUPO DE MADUREZ Y LA DISTANCIA ENTRE HILERAS EN
SOJA CON RIEGO

por

Andrés Eduardo ARROCHA RODRÍGUEZ

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

MONTEVIDEO
URUGUAY
2019

Tesis aprobada por:

Director: -----
Ing. Agr. (Dr.) Luis Giménez

Ing. Agr. (PhD.) Guillermo Siri

Ing. Agr. (Dr.) Sebastián Mazzilli

Fecha: 17 de octubre de 2019

Autor: -----
Andrés Eduardo Arrocha Rodríguez

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a mi tutor Ing. Agr. (Dr.) Luís Giménez por permitirme desarrollar este trabajo, por su constante apoyo durante la elaboración del mismo, al Ing. Agr. Federico Rovegno por su dedicación durante el desarrollo de esta tesis y al personal de laboratorio, por su colaboración constante en la parte práctica.

Especialmente a mi familia y mis amigos junto a sus familias que me acompañaron a lo largo de este camino, por el constante apoyo y por estar presentes en cada paso realizado ya que sin ellos no habría sido posible alcanzar este sueño, así como a todas aquellas personas que de una manera u otra formaron parte de mi formación.

A la Ing. Agr. (Dra.) Mónica Cadenazzi por su constante apoyo y atención y especialmente a la Lic. Sully Toledo por su dedicación y colaboración.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	2
2.1. <u>PRODUCCIÓN DE SOJA EN URUGUAY</u>	2
2.1.1. <u>Superficie, producción y rendimiento</u>	2
2.2. <u>CARACTERIZACIÓN FISIOLÓGICA DE LA SOJA</u>	2
2.2.1. <u>Principales estados de desarrollo</u>	2
2.3. <u>REQUERIMIENTOS AMBIENTALES PARA EL CULTIVO DE SOJA</u>	3
2.3.1. <u>Principales características climáticas de Uruguay</u>	3
2.3.2. <u>Importancia de la temperatura y el fotoperíodo</u>	4
2.3.2.1. Efecto de la temperatura en el desarrollo de soja	4
2.3.2.2. Efecto del fotoperíodo en el desarrollo de soja	5
2.3.2.3. Impacto de las temperaturas altas y su incidencia en el rendimiento.....	6
2.4. <u>IMPORTANCIA DEL AGUA EN EL CULTIVO DE SOJA</u>	8
2.4.1. <u>Importancia de la disponibilidad hídrica</u>	8
2.4.2. <u>Deficiencias hídricas y su impacto en el cultivo</u>	9
2.5. <u>CARACTERÍSTICAS DE LOS GRUPOS DE MADUREZ</u>	11
2.5.1. <u>Mejoramiento y adaptación en grupos de madurez</u>	11
2.6. <u>CARACTERÍSTICAS DEL ESPACIAMIENTO ENTRE HILERAS</u>	13
2.6.1. <u>Respuesta del espaciamiento entre hileras como variable de manejo</u>	14
2.7. <u>EL RIEGO SUPLEMENTARIO EN SOJA</u>	17
2.7.1. <u>Importancia del riego en soja</u>	17
2.7.2. <u>Respuesta del cultivo al riego suplementario</u>	18

2.7.3. <u>Interacciones entre el riego suplementario y prácticas de manejo asociadas al cultivo</u>	21
3. MATERIALES Y MÉTODOS	23
3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO	23
3.1.1. <u>Manejo experimental</u>	23
3.1.2. <u>Tratamientos</u>	24
3.2. DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO	25
3.2.1. <u>Hipótesis biológica</u>	25
3.2.2. <u>Diseño experimental</u>	25
3.3. DETERMINACIONES REALIZADAS	26
3.3.1. <u>Determinaciones realizadas durante el ciclo del cultivo</u>	26
3.3.2. <u>Determinaciones realizadas a cosecha</u>	26
3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	26
3.5. CONDICIONES CLIMÁTICAS EN EL PERÍODO DEL CULTIVO	27
3.5.1. <u>Precipitaciones registradas</u>	27
3.5.2. <u>Temperatura media y máxima alcanzada</u>	28
3.5.3. <u>Radiación solar incidente</u>	31
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO	32
4.1.1. <u>Evolución del agua disponible en el suelo durante el ciclo del cultivo</u> .	32
4.1.2. <u>Parámetros de crecimiento del cultivo</u>	33
4.1.2.1. Producción de materia seca	33
4.1.2.2. Evolución de la tasa de crecimiento del cultivo durante el período crítico.....	36
4.1.3. <u>Efecto de la disponibilidad hídrica y el grupo de madurez sobre el rendimiento</u>	38
4.1.4. <u>Relación entre el rendimiento alcanzado y sus componentes</u>	40
4.1.5. <u>Subcomponentes del rendimiento</u>	41
4.1.6. <u>Evapotranspiración del cultivo y eficiencia de uso del agua en los tratamientos con riego y secano</u>	44

4.1.6.1. Efecto del grupo de madurez sobre los parámetros hídricos	45
4.1.7. <u>Rendimiento del cultivo con riego vs secano</u>	45
4.1.7.1. Relación entre las estrategias evaluadas y los indicadores hídricos	45
4.1.7.2. Características hídricas y productivas según la disponibilidad hídrica.....	46
5. <u>CONCLUSIONES</u>	48
6. <u>RESUMEN</u>	49
7. <u>SUMMARY</u>	50
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	51

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Características hidrológicas del suelo.	23
2. Calendario de eventos fenológicos.....	24
3. Tasa de crecimiento para los diferentes tratamientos evaluados durante el PC.....	36
4. Rendimiento (kg ha^{-1}), número de granos por m^{-2} y peso de mil granos promedio (g) en los tratamientos evaluados.	40
5. Número de vainas por planta y número de granos por vaina en los diferentes tratamientos evaluados.	43
6. Número de granos por m^{-2} promedio, número de granos abortados por m^{-2} promedio y el porcentaje de granos abortados promedio, para el promedio de las estrategias de riego y secano evaluadas.	44
7. Rendimiento promedio, evapotranspiración total, evapotranspiración promedio en el ciclo y en el PC y eficiencia de uso del agua en dos grupos de madurez.	46
8. Rendimiento promedio, evapotranspiración total, evapotranspiración promedio en el ciclo y en el PC y eficiencia de uso del agua para el promedio de las estrategias con riego y en secano.	47
9. Disponibilidad hídrica, materia seca al final del PC, número de granos por m^{-2} , peso de mil granos y rendimiento promedio para el promedio de las estrategias con riego y en secano.....	48
Figura No.	
1. Precipitaciones (mm) registradas durante 2017-18 obtenida en el campo experimental de la EEMAC, Facultad de Agronomía y valores promedio de la serie histórica 1981 a 2012.	27
2. Temperaturas ($^{\circ}\text{C}$) medias mensuales ocurridas durante el año agrícola 2017-18 y en la serie histórica 2002-2016, obtenidas de la estación meteorológica automática de la Facultad de Agronomía. EEMAC.....	28

3. Temperaturas máximas promedio mensuales ocurridas durante el año agrícola 2017-18 y en la serie histórica 2002-2016, obtenidas de la estación meteorológica automática de la Facultad de Agronomía. EEMAC.	29
4. Evolución de la temperatura máxima diaria en post emergencia y durante los períodos críticos (PC) de ambas variedades.	30
5. Radiación solar ($\text{Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) ocurrida durante el año agrícola 2017-18 y valores promedio de la serie histórica 2002-16, obtenidas de la estación meteorológica automática de la Facultad de Agronomía. EEMAC.....	31
6. Evolución del porcentaje de agua disponible en el suelo para los tratamientos desarrollados con riego y en secano en relación a los días post emergencia (DPE).	32
7. Materia seca (kg ha^{-1}) acumulada al inicio (R4) y final (R6) del PC para cada uno de los tratamientos evaluados.	34
8. Rendimiento en grano (kg ha^{-1}) para los tratamientos evaluados.	38
9. Evolución de la evapotranspiración (ET) diaria (mm día^{-1}) para el promedio de las estrategias con riego y en secano.	44

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura en Uruguay en la última década ha experimentado una marcada expansión, siendo la soja el cultivo que representó en mayor medida el aumento en el área de producción. Sin embargo, el área de siembra se ha estabilizado en las últimas dos temporadas con un descenso cercano a las 230 mil hectáreas respecto al máximo registrado en la zafra 2013-14 con 1,3 millones de hectáreas, presentando variación en producción y rendimiento debido a la variabilidad anual (MGAP. DIEA, 2018a).

En los últimos años, la variabilidad en el precio de la soja por diferentes factores de mercado ha ocasionado una disminución en la rentabilidad del cultivo. Esto ha generado la necesidad de reducir los costos y aumentar el rendimiento para lograr un incremento de los beneficios. En las condiciones en las que se desarrolla la soja en el país, la importancia de la ocurrencia de lluvias durante el ciclo del cultivo está dada por las condiciones que presenta esta región, debido a que los suelos agrícolas tienen una capacidad de almacenaje de agua inferior a la que el cultivo consume durante su ciclo (Sawchik y Ceretta, 2005). En ese entendido, la utilización de riego suplementario aplicado durante las etapas más importantes del ciclo, como la etapa reproductiva, permite maximizar el rendimiento, reduciendo la variabilidad entre años y aumentando la rentabilidad en climas templados y húmedos como el de Uruguay (Montoya et al., 2017).

En siembras tempranas, la elección del grupo de madurez (GM) para cada región, es de importancia clave, ya que este factor va a determinar las condiciones del ambiente en el cual la soja se va a desarrollar. Para optimizar el aprovechamiento de los recursos del ambiente, el manejo de la distancia entre hileras (DH) se vuelve clave para maximizar el rendimiento.

El trabajo tuvo por objetivo evaluar la respuesta en rendimiento de soja en dos variedades de GM contrastantes, dos distancias entre hileras, dos condiciones hídricas a saber: bienestar hídrico en todo el ciclo y seco y las interacciones entre los tres factores de manejo.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. PRODUCCIÓN DE SOJA EN URUGUAY

2.1.1. Superficie, producción y rendimiento

La superficie ocupada por cultivos de verano en la zafra 2017-18 fue estimada en alrededor de 1,2 millones de hectáreas, registrando valores similares a los de la zafra anterior. La soja con 1,1 millones de hectáreas representó el 92 % del área, siendo su producción estimada en 1,3 millones de toneladas presentando un descenso considerable respecto a la zafra anterior de 41 %. La soja con riego presentó una superficie de casi 13,7 mil hectáreas, incrementando en 52 % en relación a la zafra anterior. El área de soja se ha estabilizado en las últimas dos temporadas con un descenso cercano a 230 mil hectáreas respecto al máximo registrado en la zafra 2013-14 con 1,3 millones de hectáreas, presentando variaciones en la producción y el rendimiento por la variabilidad climática entre temporadas (MGAP. DIEA, 2018a).

El rendimiento promedio de soja a nivel nacional en el año 2017 fue de 1214 kg ha⁻¹ este representó el rendimiento menor desde la zafra 2000-01 y una disminución de 59 % en comparación al año anterior que alcanzó 2951 kg ha⁻¹, siendo en este caso el récord histórico del rendimiento en el país. En 2017 en condiciones de secano el rendimiento promedio de soja de primera fue de 1209 kg ha⁻¹, en tanto, la de segunda alcanzó a 1162 kg ha⁻¹. El rendimiento obtenido cuando el cultivo se realizó con riego, tanto de primera como de segunda fue de 2824 kg ha⁻¹, es decir 139 % superior al rendimiento en secano. Las variaciones registradas en el rendimiento se explican principalmente por las deficiencias hídricas registradas en el verano que afectaron al cultivo en gran parte de su ciclo (MGAP. DIEA, 2018b).

2.2. CARACTERIZACIÓN FISIOLÓGICA DE LA SOJA

2.2.1. Principales estados de desarrollo

Fehr y Caviness (1977) determinaron la escala más ampliamente utilizada en soja que describe los principales estados fenológicos del desarrollo. La escala fenológica divide los estados de desarrollo de soja en estados vegetativos y reproductivos. Esta escala propone una descripción de la morfología del cultivo, cuya validez es independiente del cultivar utilizado o de las condiciones generales del cultivo. Para ello toma en cuenta los cambios morfológicos ocurridos en el tallo principal del 50 % de las plantas del cultivo.

Los estados vegetativos describen la sucesiva aparición de hojas, teniendo en cuenta el número de nudos que presentan hojas totalmente desarrolladas. En tanto, los estados reproductivos se basan en la floración, el desarrollo de vainas, el desarrollo de los granos y su maduración (Kantolic et al., 2003). De acuerdo con Kantolic et al. (2003), la fase germinación-emergencia es una de las más críticas, factores como temperatura, humedad de suelo y la profundidad a la que se lleva a cabo la siembra son determinantes

del establecimiento de plántulas y por ende determinan el éxito de la implantación del cultivo. Las primeras dos hojas son unifoliadas y opuestas, y a continuación se desarrollan hojas trifoliadas y alternas, dichas hojas continúan apareciendo hasta avanzado el estado R4 (Toledo, 2015b).

La formación de hojas, tanto en el tallo principal como en las ramificaciones se extiende durante gran parte de los periodos de floración y fructificación, originando una superposición entre la aparición de hojas y la aparición de órganos reproductivos (Toledo, 2015b). Asimismo, este autor señala que el número final de nudos está dado por el hábito de crecimiento que presenta el tallo principal, siendo este un atributo genético. Por lo tanto, los diferentes cultivares de soja se los puede clasificar según el tipo de crecimiento que desarrollen en variedades determinadas, semi-determinadas e indeterminadas (Bernard, 1972).

El comienzo de la floración (R1) coincide con la apertura de la primera flor en cualquier nudo del tallo principal. En general dicha etapa comienza en la parte media de la planta, continuando progresivamente hacia la parte superior e inferior (Baigorri, 2009). Kantolic et al. (2003) consideran que esta etapa se caracteriza por la aparición y crecimiento de flores, frutos y granos, donde prosigue paralelamente la aparición de hojas. Los estados reproductivos abarcan cuatro distintas fases de desarrollo reproductivo de la planta, ellos son floración (R1 y R2), crecimiento de vainas (R3 y R4), crecimiento de granos (R5 y R6) y maduración de la planta (R7 y R8, Farias et al., 2007).

2.3. REQUERIMIENTOS AMBIENTALES PARA EL CULTIVO DE SOJA

2.3.1. Principales características climáticas de Uruguay

El clima del Uruguay está definido por su ubicación geográfica en el continente (30 y 35° de LS), su posición con relación al océano Atlántico, el relieve de su territorio y zonas circundantes, así como la circulación atmosférica regional, se ubica en una zona subtropical templada típica (Durán et al., 1999).

El Uruguay se caracteriza por presentar clima templado y húmedo, las temperaturas promedio son de alrededor de 18 °C, con precipitaciones (PP) anuales que varían de 1200 a 1600 mm de acuerdo a la zona del país. El verano se caracteriza por deficiencias hídricas que no satisfacen la demanda de los cultivos, siendo altamente dependientes de las PP que se registren generando alta variabilidad en los rendimientos finales (Castaño et al., 2011). Las características climáticas que determinan el ambiente de producción actúan en forma directa en el rendimiento alcanzable de la soja, la radiación solar (RS) y la temperatura, junto con el agua, son las principales variables agrometeorológicas (Gerster y Bacigaluppo, 2009). En las regiones templadas la temperatura y la distribución de las lluvias determinan conjuntamente la época del cultivo (Whigham y Minor, 1978).

Las temperaturas medias en verano oscilan entre 25 y 26 °C. Las temperaturas máximas medias durante el mes de enero están comprendidos entre 28 y 32 °C, siendo la región más caliente la zona noroeste que comprende los departamentos de Artigas, Salto y Paysandú. Para la serie histórica evaluada (1980-2009) el acumulado anual de PP en Paysandú oscila en 1240 mm (Castaño et al., 2011).

2.3.2. Importancia de la temperatura y el fotoperíodo

La temperatura y el fotoperíodo regulan la duración de las fases de desarrollo de la soja (Kantolic et al., 2003). Ambos factores actúan simultáneamente y hay algunas evidencias de que existen interacciones entre ellos (Kantolic et al., 2003).

2.3.2.1. Efecto de la temperatura en el desarrollo de soja

La temperatura regula el desarrollo a lo largo de todo el ciclo de la soja. Asimismo, los requerimientos térmicos y las temperaturas cardinales que regulan la tasa de desarrollo difieren a lo largo de las fases de desarrollo (Kantolic et al., 2003). Al respecto, Miralles et al. (2004) señalan que la duración de las etapas fenológicas de soja se expresa en °C día⁻¹, representando al tiempo térmico con el que se determina la duración de cualquier etapa del desarrollo, la misma ocasiona marcados efectos durante la fase vegetativa.

El requerimiento térmico para la fase germinación-emergencia está comprendido entre 6 y 9 °C, presentando un rango óptimo que oscila entre 25 y 30 °C, cuando se producen temperaturas superiores se enlentece el crecimiento, en ocasiones el mismo se detiene cuando la temperatura se encuentra por encima de los 40 °C (Kantolic et al., 2003). Toledo (2015a) señala que la temperatura óptima para el desarrollo normal vegetativo y reproductivo se encuentra entre los 25 y 30 °C y las temperaturas óptimas nocturnas para el crecimiento se encuentran entre los 21 y 27 °C.

Farias et al. (2007) indican que la soja se adapta mejor a regiones con temperaturas entre 20-30 °C, los registros inferiores o iguales a 10 °C y temperaturas por encima de 40 °C no son recomendables ya que las mismas tienen un efecto adverso sobre la tasa de crecimiento, provocan daños en floración y disminuyen la capacidad de retención de vainas. La fijación de las vainas se retarda con temperaturas menores a 22 °C y cesa con temperaturas menores a 14 °C. Miralles et al. (2004) reportan que la soja presenta respuesta universal a la temperatura, esto significa que no existe insensibilidad a este factor, por lo que todos los cultivares y todos los períodos de desarrollo son sensibles a la misma. Estos autores consideran que dicha respuesta universal a la temperatura es responsable de la aceleración ocurrida en el desarrollo cuando las plantas se exponen a valores elevados, generando que la duración de cualquier etapa transcurra más rápidamente.

Farias et al. (2007) en referencia a la floración en soja mencionan que la misma es inducida cuando se generan temperaturas por encima de 13 °C. Al alcanzar los estadios

R2 y R5 se necesitan registros de temperatura media diaria cercanas a los 26 °C, ésta condición junto a la máxima intercepción de luz, son factores determinantes de la tasa de crecimiento del cultivo (TCC). En tanto que, en referencia a la maduración del cultivo, puede ser acelerada por la ocurrencia de altas temperaturas (Gerster y Bacigaluppo, 2009).

2.3.2.2. Efecto del fotoperíodo en el desarrollo de soja

La soja es una especie que se considera de día corto con respuesta cuantitativa, esto significa que la floración ocurre de todas maneras, solo que el tiempo requerido para ello dependerá de la longitud del día, siendo más rápida la inducción con días cortos que con días largos (Bodrero et al., 2002). Farias et al. (2007) consideran que la sensibilidad al fotoperíodo es una característica variable entre cultivares, donde cada cultivar posee su fotoperíodo crítico, encima del cual la floración se ve retrasada, lo que determina que la soja se considere de día corto.

El fotoperíodo también afecta la tasa de desarrollo en la soja, a diferencia de la respuesta de la temperatura, de efecto universal, las respuestas fotoperiódicas varían con la especie y con el estado de desarrollo. En la soja existe una fase juvenil de insensibilidad que le permite a las plantas la formación de un número mínimo de hojas en el ápice de crecimiento (Miralles et al., 2004). El fotoperíodo comienza su regulación cuando termina la fase juvenil o pre inductiva (posterior a V1, Toledo, 2015a). Dada la sensibilidad de cada cultivar al fotoperíodo, se pueden clasificar de acuerdo a como se afecta la tasa de desarrollo, según la respuesta fotoperiódica se pueden clasificar en: a) cualitativa donde es necesario superar un valor de umbral crítico para que se produzca la floración; y b) cuantitativa donde la mayor o menor respuesta va a depender del grado de sensibilidad del GM (Miralles et al., 2004).

Kantolic et al. (2003) indican que el fotoperíodo regula la mayor parte de los eventos reproductivos como la iniciación floral, la fructificación y el llenado de granos. En tanto, para Toledo (2015a) el efecto principal del fotoperíodo es el de inducir la floración. Kantolic y Slafer (2001) mencionan que el fotoperíodo tiene implicancia en la duración del período de formación de vainas y granos, esto ocasiona diferentes respuestas en el número final de granos.

De acuerdo con lo reportado por Toledo (2015b), los GM menores o bajos (II, III, IV y V corto) requieren más horas de luz para inducir la floración y los GM mayores o altos (V largo, VI, VII, VIII) responden con menor fotoperíodo. Los GM menores al ser menos sensibles responden fundamentalmente a la acumulación térmica, y a medida que el GM es mayor -más sensibles- el efecto de las horas de luz sobre el desarrollo es mayor. Asimismo, Wegerer et al. (2015) señalan al respecto que los GM más altos presentan mayor largo de ciclo respecto a aquellos GM bajos.

Toledo (2015b) señala que la TCC se encuentra estrechamente relacionada con la intercepción solar, alcanzando su máximo valor cuando el canopeo es capaz de

interceptar el 95 % de la RS incidente, denominándose IAF crítico. En tanto, Girón et al. (2015) mencionan que es en el período crítico (PC) en que el cultivo debe alcanzar la mayor captura de radiación, para lograr altas TCC, para ello el cultivo debe lograr el IAF crítico en R3. Toledo (2015b) afirma que, si el cultivo no logra alcanzar el IAF crítico, la primera consecuencia es su menor eficiencia en la captación de la radiación, esto lleva a una menor TCC, por lo tanto el rendimiento disminuye.

2.3.2.3. Impacto de las temperaturas altas y su incidencia en el rendimiento

En soja, las temperaturas altas tienen mayor impacto negativo sobre el rendimiento durante los estadios reproductivos que durante los estadios vegetativos, dada la alta vulnerabilidad que presentan los órganos reproductivos al estrés térmico (Thuzar, 2010). En el período reproductivo, un estrés térmico temprano, durante el período de fijación de granos (R1-R5), reduce el número de granos (NG, Egli 1998, Molino et al. 2007), mientras que un estrés térmico posterior, durante el período de llenado de granos (R5-R7), reduce el tamaño de los granos (Baker et al. 1989, Dornbos y Mullen 1991). Los incrementos en la temperatura durante la fase de fructificación pueden reducir la fotosíntesis y el aporte de asimilados a las vainas promoviendo su aborto (Boote et al., 1998).

El rango de temperaturas que optimiza la tasa de producción de vainas se encuentra entre 21,5 y 26,5 °C siendo más estrecho que el que optimiza los procesos de crecimiento y partición (Boote et al., 1998). Las temperaturas moderadamente altas (25 a 32 °C) durante llenado de granos o breves períodos (3-5 días) de muy altas temperaturas (33 a 40 °C) resultan más perjudiciales sobre el peso de granos que temperaturas moderadamente elevadas sostenidas durante un período más largo de tiempo (Wardlaw et al., 2002). Dombos y Mullen (1991) coinciden en que temperaturas entre 32 °C y 38 °C reducen los componentes del rendimiento. En tanto, Lindsey y Thomson (2012) informaron que la temperatura óptima de la soja varía de 25 °C a 29 °C y que la sobrevivencia de las vainas se ve gravemente afectada por encima de los 37 °C.

La aparición y supervivencia de flores y vainas responden de manera dinámica a cambios en el flujo de asimilados en la etapa de determinación del número de vainas. El aborto de flores y vainas jóvenes es el mecanismo preponderante en definir el número final de vainas pero, ante restricciones severas, la mortandad de vainas de mayor tamaño puede incrementarse (Egli y Bruening, 2006). Las disminuciones inducidas por las altas temperaturas en la fotosíntesis, la abscisión y el aborto de flores, los granos en desarrollo y las vainas jóvenes se encuentran entre las razones más importantes para la reducción del rendimiento (Prasad et al., 2006). Djanaguiraman y Prasad (2010) demostraron que episodios de estrés térmico durante la fase reproductiva incrementan la tasa de producción de etileno, causando reducciones significativas en el número de vainas fijadas. Las condiciones de estrés, como el calor y la sequía durante la formación de granos, aceleran la senescencia de las hojas, lo que implica una pérdida de la capacidad fotosintética y, por lo tanto, acorta la duración del período de llenado de grano, lo que produce un efecto

perjudicial sobre el peso de los mismos (Egli y Bruening 2007, Masclaux-Daubresse et al. 2010, Gregersen et al. 2013).

Gibson y Mullen (1996) encontraron que un régimen térmico de 35 °C durante el día y entre 20 °C y 30 °C durante la noche desde R1 a R5 provocó disminuciones del rendimiento cercanas al 16 %. En tanto, estudios llevados a cabo en ambiente controlado mostraron reducciones en el rendimiento del orden del 35 % con temperaturas medias diarias de 27,5 °C con respecto al control de 17,5 °C, siendo el 88 % de la variación en rendimiento explicada por diferencias en el NG entre tratamientos (Heinemann et al., 2006). Djanaguiraman et al. (2011) determinaron que temperaturas diurnas de 38 °C y nocturnas de 28 °C durante floración generaron un incremento en la abscisión de flores, lo cual fue la razón de la disminución del porcentaje de vainas. Asimismo, Egli y Bruening (2006) consideran que ante temperaturas de 38 °C durante el día y 30 °C en la noche se produce el aborto de flores, vainas y granos ya que desciende el suministro de fotoasimilados.

Molino (2011) en sus evaluaciones destaca un descenso del 38 % en la tasa de fijación de vainas en cultivares de soja que enfrentaron estrés térmico durante el PC en condiciones de secano. El estrés térmico en fructificación redujo el NG en 17 y 42 % bajo riego y secano, respectivamente. Este autor considera que la supervivencia de vainas se asocia con las condiciones del ambiente durante las etapas del desarrollo, siendo alteradas por el estrés térmico. La reducción en el número de vainas fijadas se asoció directamente con el NG logrados, dado que el NG por vaina no sufrió cambios. El estrés térmico y el secano redujeron significativamente el NG aunque no se registraron efectos de los estreses aplicados sobre el peso de granos (Molino, 2011).

Bazán (2015) en Argentina, en evaluaciones del rendimiento en soja ante condiciones de estrés térmico, estrés hídrico y la interacción entre ambos durante llenado de granos, destaca un descenso del orden del 22 % cuando el cultivo enfrentó estrés térmico, y entorno al 61 % frente al tratamiento control cuando fue sometido a estrés térmico e hídrico. Las reducciones fueron explicadas principalmente por disminuciones en el NG que fue del orden del 22 % para el tratamiento de estrés hídrico, encontrando un efecto compensatorio en el peso de granos en los tratamientos expuestos a estrés térmico bajo riego y estrés hídrico. Ergo (2013) reporta en sus evaluaciones que ante estrés térmico el rendimiento de soja disminuye 20 % y los tratamientos que enfrentan estrés térmico e hídrico registraron un descenso del 41 % en relación al tratamiento control, siendo explicado por el descenso en el NG y en el peso de los mismos, aunque en situaciones de estrés térmico bajo riego el peso fue similar al control, sugiriendo un efecto compensatorio. El autor concluye que la combinación de estrés térmico e hídrico durante el llenado de granos producen alteraciones en la fuente fotosintética observándose una aceleración del proceso de senescencia foliar que afecta a la fuente, repercutiendo sobre el rendimiento (Ergo, 2013).

Cencig y Villar (2008) señalan que el estrés por elevadas temperaturas durante el llenado de granos disminuye la productividad de soja, especialmente si este estrés se produce entre R5 y R6; posteriormente, un estrés de este tipo provoca una disminución en el peso de los granos, pero no tiene efecto sobre el principal componente del rendimiento es decir el NG por unidad de superficie. Kavanová et al. (2017) evaluaron el efecto del estrés térmico durante la fase generativa (R3) sobre el rendimiento en materiales de los GM IV, V y VI. Los tratamientos contaron con riego suplementario durante su ciclo, siendo sometido a estrés térmico en R3 frente al control sin estrés térmico, registraron una reducción del rendimiento de grano en la mayoría de los genotipos analizados. Esta reducción, estuvo directamente asociada con el número de vainas producidas y fijadas, en promedio, solamente un 43 % de las vainas producidas llegó a la madurez y contribuyó al rendimiento final. El NG por vaina y el peso promedio de grano no fueron afectados por el estrés térmico. A su vez, determinaron que el estrés térmico durante la fase de activa producción de vainas puede limitar el rendimiento final incluso en plantas que están en buenas condiciones de disponibilidad de agua.

2.4. IMPORTANCIA DEL AGUA EN EL CULTIVO DE SOJA

2.4.1. Importancia de la disponibilidad hídrica

La soja es una especie resistente al estrés hídrico, siempre que esta condición no ocurra en etapas críticas de la planta (Gava et al., 2016). Kuss (2006) considera que la productividad de la soja se ve afectada por factores intrínsecos a sus cultivares, presentando diferentes respuestas entre ellos al manejo del riego y a la población de plantas, este autor señala que la irrigación y la elección del material genético son factores que inciden en el rendimiento del cultivo. El consumo potencial de agua de la soja tiene relación directa con la RS que incide sobre ésta, influyendo también el período de exposición a la misma y las características propias (Giménez y García, 2011).

El estrés generado por sequía es uno de los estreses abióticos más destructivos, afectando a la soja ya que es sensible a las deficiencias hídricas (Liu et al., 2004). En tanto, Fernandes y Turco (2003) mencionan que el estrés hídrico puede causar una reducción del potencial hídrico foliar, cierre estomático, disminución de la tasa fotosintética, reducción de la parte aérea, aceleración de la senescencia y abscisión de las hojas, afectando el rendimiento de soja.

Según Vivan et al. (2013) el rendimiento de la soja está vinculado a la aleatoriedad climática, considerando al déficit hídrico como el principal agente productivo limitante. Asimismo, Zarei et al. (2017) afirman que el déficit hídrico más que otros estreses limita el crecimiento, lo que genera impactos negativos en el rendimiento. Ku et al. (2013) mencionan que el rendimiento de la soja sembrada en secano presenta una reducción significativa, en comparación a aquellos cultivos desarrollados bajo riego.

Farias et al. (2007) señalan que la disponibilidad hídrica durante la estación de crecimiento constituye la principal limitación en la expresión del potencial de rendimiento y es la mayor causa de la variabilidad del rendimiento de granos observados entre años, por lo tanto es importante el suministro de agua principalmente en dos períodos del cultivo: germinación-emergencia y floración-llenado de granos. Las necesidades de agua en el período floración-llenado de granos es de 7 a 8 mm/día, el máximo consumo coincide con el período que presenta la mayor altura e IAF. Estos autores determinaron que las necesidades totales de agua para obtener el rendimiento máximo varían entre 450 a 800 mm/ciclo, dependiendo de las condiciones climáticas, del manejo cultural y de la duración del ciclo.

2.4.2. Deficiencias hídricas y su impacto en el cultivo

Los cultivos pueden manifestar deficiencias hídricas, en especial a las horas de máxima demanda atmosférica, cuando la absorción de agua por las raíces es insuficiente para compensar las pérdidas por transpiración. Si este desbalance es muy pronunciado y/o se prolonga en el tiempo, genera en el cultivo una situación de estrés hídrico que afecta su normal funcionamiento. El déficit hídrico suele provocar pérdida de turgencia, que resulta en una disminución de la tasa de crecimiento y da como resultado un menor tamaño final de los órganos que se encuentran en expansión activa en el momento del estrés. En los cultivos estos efectos se aprecian a escala productiva, lo cual implica la consideración de los órganos de cosecha al definir períodos susceptibles. Esto impone conocer tanto los regímenes estacionales de PP y demanda evaporativa como la fenología y los períodos críticos para la ocurrencia de una sequía (Dardanelli et al., 1992).

Las deficiencias hídricas se presentan como una limitante para la obtención de los rendimientos potenciales, destacándose como el factor principal en causar pérdidas en los rendimientos (Boyer, 1982). Asimismo, Giménez et al. (2014b) mencionan que las deficiencias hídricas son consideradas la principal limitante ambiental para los cultivos de verano. Las diferencias entre el potencial de rendimiento y el rendimiento obtenido da la dimensión de las pérdidas por estrés que afectan a la soja (Evans, 1983).

El déficit hídrico afecta el crecimiento de la soja y la formación temprana de la vaina, causando reducciones significativas del número y peso de los granos y hace más temprana la maduración de las vainas, lo cual disminuye el rendimiento del grano por unidad de superficie hasta en 50 % (García y Ferrarotto, 2009). Asimismo, Westgate et al. (1989) mencionan que el área foliar se reduce y la biomasa en el grano disminuye como consecuencia de bajas tasas fotosintéticas, reducción en la suplencia de asimilados e inhibición del metabolismo del grano.

Las etapas del ciclo de mayor sensibilidad a la ocurrencia de deficiencias hídricas son las comprendidas entre fructificación avanzada y el llenado de granos, etapas entre R4 y R6, este es considerado el periodo más crítico de determinación del rendimiento (Giménez, 2014a). Esto se debe, a que durante estas etapas la capacidad de compensación

del cultivo se ve reducida, debido a que al aborto floral por deficiencias hídricas se le agrega el de las vainas de menor tamaño, que son las estructuras reproductivas que presentan mayor susceptibilidad de abscisión (Giménez, 2014a). Asimismo, Toledo (2015) señala que entre R4,5 y R5,5 es el momento más sensible, ya que ha finalizado la floración y cualquier situación de stress alrededor de R5 afectará el número final de vainas y de granos, influyendo negativamente en el rendimiento.

García y Ferrarotto (2009) consideran que la etapa de desarrollo en que ocurran las deficiencias hídricas y las magnitudes que presenten las mismas serán determinantes en el rendimiento. Mundstock y Thomas (2005) mencionan que la sensibilidad del cultivo es mayor al avanzar el ciclo del mismo, siendo mínima durante la fase vegetativa y máxima durante la formación de vainas y llenado de granos, estos autores señalan que ante severas limitaciones hídricas en la fase vegetativa se puede comprometer el rendimiento de granos debido al bajo desarrollo vegetativo.

En investigaciones desarrolladas por Gava et al. (2016) en Brasil, determinaron que ante la ocurrencia de déficit hídrico en el período comprendido entre la completa formación de vainas y llenado de granos se ve afectada la producción final de la soja. De igual forma, Gajić et al. (2018) consideran que el estrés hídrico es principalmente dañino durante la floración, el establecimiento de granos y el llenado de granos. Según Gava (2014) deficiencias hídricas durante llenado de granos reducen hasta 64 % la producción final frente a soja regada. Las reducciones en rendimiento causadas por sequía son muy marcadas, alcanzando hasta el 40 % (Manavalan et al., 2009). En ensayos realizados por Basal y Szabó (2018) en Hungría, determinaron que la deficiencia de agua en la etapa de plena floración (R2) tiene una influencia notable en la fisiología y el rendimiento de soja.

Giménez (2010) evaluando diferentes situaciones de disponibilidad hídrica en soja, comparó 3 alternativas, la primera de bienestar hídrico, la segunda de déficit hídrico en el PC y la tercera en secano. Las diferencias entre el tratamiento con alta disponibilidad hídrica en el PC y el de baja disponibilidad se vieron reflejadas en el número de grano/m², mientras que no hubo diferencias en el peso de los granos entre tratamientos. Las deficiencias de agua en el PC en el tratamiento de déficit hídrico representaron una disminución del rendimiento del 50 %.

Las necesidades de agua totales de soja evaluadas a través de la ETc y la evapotranspiración real (ETr) fueron estudiadas por Giménez y García (2011) en Uruguay, analizando una serie histórica de 1984 a 2006, donde se incluyen dos cultivares de soja en dos zonas contrastantes, determinaron que la ETc promedio total en el GM IV fue mayor en el Sur, en tanto la ETc diaria fue mayor en el Norte. Al analizar el GM VI el comportamiento fue inverso siendo mayor en el Norte que en el Sur, lo que se debió a las diferentes duraciones de ciclo entre localidades, producto de la importancia del fotoperíodo. En relación a la ETr, la soja de GM VI alcanzó los mayores registros, dado por su mayor largo de ciclo y las ETr menores fueron estimadas para la soja de GM IV.

2.5. CARACTERÍSTICAS DE LOS GRUPOS DE MADUREZ

Los grupos de madurez agrupan a los genotipos de soja de acuerdo a su respuesta a la temperatura y el fotoperíodo (Inouye et al., 1979). Toledo (2015a) destaca que la respuesta al fotoperíodo se modifica según la temperatura, y esta influye significativamente en aquellos GM de menor sensibilidad como el IV, de modo tal que cuanto más bajo es el GM, responden más a los cambios en la temperatura, y a medida que aumenta el GM es mayor la respuesta al fotoperíodo como sucede con el VI. En tanto, Díaz Zorita (2004) menciona que debido a la respuesta fotoperiódica de la soja, los cambios en latitud modifican la longitud de ciclo de cada cultivar, los que incrementan su ciclo a medida que se los cultiva en latitudes más altas, esto se produce hacia el Sur del hemisferio Sur. Asimismo, Toledo (2018) en Argentina, también menciona que la utilización de un GM con un determinado largo de ciclo, va a depender de la latitud donde se siembre.

La respuesta fotoperiódica de la soja provoca una adaptación diferencial de los cultivares a cada región. En general, cuando se siembran cultivares de ciclo más corto que lo recomendado, estos florecen anticipadamente, reducen su crecimiento y por lo tanto su rendimiento, en tanto, si se siembran cultivares de ciclo más largo de los adaptados, se retrasa demasiado el inicio de la fructificación (Díaz Zorita, 2004). Satorre et al. (2003) encontraron que los GM cortos son poco sensibles al fotoperíodo y como las temperaturas son altas en el momento en el que ocurre el PC la etapa tiende a acortarse.

2.5.1. Mejoramiento y adaptación en grupos de madurez

Díaz Zorita (2004) reporta que el mejoramiento genético ha seleccionado en los GM IV o menores cultivares con hábito de crecimiento indeterminado y en los GM V o mayores cultivares con hábito de crecimiento determinado. El fundamento para esto es que la menor extensión del período libre de heladas de las latitudes en las que están adaptados los cultivares de GM 000 al IV obliga a reducir la longitud del ciclo de vida de los mismos. En situaciones donde las condiciones tanto edáficas, como climáticas e hídricas son propicias para un óptimo desarrollo del cultivo, Baigorri (2004) señala que los cultivares de ciclo corto son los que expresan un mayor potencial de rendimiento, reduciendo principalmente la incidencia del vuelco y problemas sanitarios. Los hábitos de crecimiento indeterminados permiten mantener la duración de las etapas reproductivas adelantando la ocurrencia de las mismas, superponiéndolas a etapas vegetativas y contribuyendo a aumentos en el crecimiento en altura. En tanto, los cultivares de GM V al IX disponen de estaciones de crecimiento más largas en las latitudes que están adaptados y tienen a floración un adecuado crecimiento en altura. Al extenderse el crecimiento en altura luego de la floración se incrementan las posibilidades de vuelco.

El mejoramiento genético ha logrado cultivares con crecimiento determinado en GM más precoces que los GM V al X, en relación al crecimiento indeterminado, la mayoría de los cultivares de los GM 000 al IV presentan este tipo de crecimiento, a través

del mejoramiento genético se ha logrado incorporar esta característica a cultivares de GM más elevados, principalmente al GM V y recientemente al VI y VII (Bodrero, 2003). En los últimos años el mejoramiento genético realizado en los GM IV al VII, ha logrado cultivares con hábito de crecimiento determinado y semideterminado en el GM IV, para ambientes de alta productividad de EE.UU. y cultivares semideterminado e indeterminados en los GM V al VII (con mejoras en el comportamiento al vuelco), adaptados a ambientes de menor productividad o para siembras muy tempranas en Argentina, siendo actualmente el GM V es el que dispone de mayor cantidad de cultivares indeterminados (Baigorri, 2004).

Ceretta y Mandl (2002) evaluaron la adaptación de cultivares de soja en Uruguay, los mismos fueron agrupados de acuerdo a su ciclo (GM) desde el III al VIII, se los agrupó en ambientes de alto y bajo potencial de rendimiento. En el caso de los ambientes de alto potencial, las PP durante llenado de grano fueron superiores a los 180 mm mientras que esta variable estuvo por debajo de 130 mm para los ambientes de menor potencial de rendimiento, los cultivares de GM III tuvieron un comportamiento superior al promedio en ambientes de alto potencial de rendimiento. Contrariamente, los cultivares de los GM V y VI tuvieron un comportamiento superior al promedio en los ambientes de menor expresión del rendimiento mientras que en ambientes de muy alto rendimiento tuvieron un comportamiento inferior (en algunos casos igual) al promedio. Los cultivares del GM IV no se asociaron a ninguno de los grupos de ambientes.

En tanto, Ceretta y Vilaró (2003) en sus investigaciones, destacan que los cultivares de GM V y VI presentaron rendimientos más consistentes y estables, mientras que los rendimientos logrados con GM IV fueron de muy buen nivel con una tendencia a menor estabilidad. Asimismo, Toledo (2018) caracteriza a los GM menores (II al V corto) como de alta productividad, aunque presentan inestabilidad productiva ante cualquier deficiencia u estrés ambiental. En tanto, los GM mayores (V largo al VIII), presentan menor productividad que los GM menores en condiciones óptimas ambientales, pero su principal característica es la estabilidad productiva, que aumenta con el GM, y sobre todo cuando tienen hábito de crecimiento determinado.

Ceretta y Mandl (2002) determinaron que los cultivares que mejor se adaptan a las condiciones del país, en el sentido que presentan un mejor balance entre potencial de rendimiento y estabilidad son aquellos pertenecientes a los grupos V, VI, y VII. Los cultivares de ciclo más corto presentan elevado potencial de rendimiento relativo en condiciones ambientales óptimas, sin embargo su rendimiento se resiente mucho en condiciones de estrés. Es decir que son de elevado potencial pero pobre estabilidad. En tanto, Ceretta y Vilaró (2003) consideran que cultivares de ciclo corto presentan como ventaja la posibilidad de adelantar la cosecha en aproximadamente un mes en siembras tempranas y 20 días en siembras tardías.

Ceretta y Vilaró (2003) destacan la importancia de utilizar adecuadamente los GM en relación a la latitud, la fecha de siembra y el potencial de rendimiento, así como

diversificar la fecha de ocurrencia de los estadios fenológicos críticos, constituyéndose en una variable de fundamental incidencia en el resultado final del cultivo. Giménez (2007) en evaluaciones acerca de la caracterización fenológica y la delimitación de la ubicación temporal del PC de seis GMs de soja, en ambientes con temperaturas y fotoperíodos diferentes, concluye que en los seis GMs a medida que se retrasa la fecha de siembra las longitudes de los ciclos se redujeron, producto de un incremento de las temperaturas medias y menor fotoperíodo. En relación al largo del ciclo, en las localidades del Norte, los mismos son más cortos, a excepción del GM IV, y presentan una ubicación anterior del PC, debido a las mayores temperaturas medias y menor fotoperíodo.

Ceretta et al. (2004) en distintos ambientes de Uruguay, determinaron que los cultivares de ciclo corto (IV) se comportaron en promedio relativamente mejor cuando se presentan deficiencias hídricas en los meses de febrero y marzo. En cambio, cuando se registra déficit hídrico durante el mes de enero, el V y el VI son los de mejor desempeño ya que el período de llenado de granos ocurre en los meses siguientes. Asimismo, consideran que por efecto de la diversidad climática no se pudo definir que GM es el más apropiado para la región. Ceretta et al. (2018) desarrollaron un cultivar de GM VI que se adapta bien a todo el rango de fechas de siembra y localidades estudiadas, siendo adecuado para ser utilizado en siembras tempranas de fines de octubre-inicios de noviembre, ya que en estas condiciones inicia la fase reproductiva hacia fines de enero, haciendo que el PC escape al momento de mayor probabilidad de enfrentar déficit hídrico y, por lo tanto, logrando en promedio muy buenos resultados.

2.6. CARACTERÍSTICAS DEL ESPACIAMIENTO ENTRE HILERAS

El espaciamiento entre hileras es una variable de manejo que puede tener, en determinadas situaciones, un importante efecto en el rendimiento de los cultivos. Una distribución más equidistante de las plantas produce un cierre más temprano del canopeo, lo que asegura una adecuada cobertura del suelo durante el PC para la determinación de rendimiento (Shibles y Weber, 1965). Asimismo, Shon et al. (1997) determinan que se produce un incremento en el porcentaje de intercepción de RS, lo que, a su vez resulta en el incremento de la producción de materia seca (MS). Egli (1988) en referencia a la relación entre el espaciado entre hileras y el rendimiento sugirió que se puede obtener el rendimiento máximo cuando la comunidad de plantas produce suficiente área foliar para proporcionar la máxima intercepción de la luz durante el crecimiento reproductivo. En tanto, el espaciado equidistante entre las plantas maximiza el rendimiento porque minimiza la competencia entre plantas por el espacio, el agua, los nutrientes y la luz.

Andrade y Sadras (2000b), Toledo (2018) afirman la importancia en la disminución en la competencia intraespecífica por luz, agua y nutrientes durante las primeras etapas del cultivo al mejorar la distribución espacial de las plantas. Andrade et al. (2019) señalan que la reducción del espaciamiento entre hileras conduce a un cierre más temprano del canopeo, lo que lleva a incrementos en la captura de la RS incidente durante las etapas críticas del cultivo para la determinación del rendimiento. Del mismo

modo, Díaz Zorita (2004) resalta la importancia del distanciamiento entre hileras en lograr la mayor área de intercepción foliar lo más rápido posible. En tanto, Baigorri (2004) menciona que no todos los cultivares responden por igual al espaciamiento entre hileras, dependiendo del genotipo. Los cultivares más precoces y con menor cantidad de ramificaciones presentan mayor respuesta a la reducción de la distancia entre surcos (Girón et al., 2015).

2.6.1. Respuesta del espaciamiento entre hileras como variable de manejo

La distribución espacial de plantas ideal es la de equidistancia en y entre la línea de siembra y contribuye a la óptima distribución de recursos (radiación, agua y nutrientes, Díaz Zorita, 2004). La elección del espaciamiento entre surcos depende de la fecha de siembra, la latitud, las condiciones ambientales y las características del cultivar. En condiciones ambientales limitantes, para el crecimiento del cultivo, la reducción del espaciamiento contribuye a mejorar el aprovechamiento de la radiación, el control de malezas e incrementa el rendimiento. El espaciamiento entre las líneas y la densidad de plantas en estas pueden ser manipulados, con la finalidad de establecer el arreglo más adecuado a la obtención de mayor rendimiento (Tourino et al., 2002). Asimismo, Rambo et al. (2004) consideran que la reducción del espaciamiento entre líneas va a generar mejor distribución de plantas en el área, dado por la equidistancia de las plantas dentro de la misma línea y con plantas de otras líneas.

En una misma población, ocurre mayor competencia entre plantas debido al sombreado en espaciamientos anchos, donde las plantas están más cerca en la línea frente a espaciamientos más reducidos (Rambo et al., 2004). Al respecto, Tourino et al. (2002) reportan que menores espaciamientos en una misma población que proporcionen una mejor distribución espacial de las plantas favorece a incrementar el aprovechamiento de la RS producto de la reducción de la densidad de plantas en las líneas. En tanto, Endres (1996) considera que la población de plantas es el factor que menos afecta la productividad, siempre que las plantas estén distribuidas uniformemente en el área.

Tourino et al. (2002) señalan que las plantas distribuidas de forma desuniforme implican el aprovechamiento ineficiente de los recursos disponibles. En el caso de la soja, la acumulación de plantas en algunos puntos puede provocar el desarrollo de plantas más altas, menos ramificadas, con menor producción individual, diámetro del tallo más reducido, lo que lleva a mayores riesgos de vuelco (Endres, 1996). Por otro lado, espacios vacíos en la línea, además de facilitar el desarrollo de malezas, llevan al establecimiento de plantas de soja con porte reducido (Tourino et al., 2002). De Bruin y Pedersen (2011), Saitoh (2011) hacen referencia a que una mayor densidad de plantas aumenta la competencia entre las plantas en una etapa temprana, lo que ocasiona una reducción en la expansión del área foliar, la tasa de crecimiento de los cultivos y el rendimiento de los granos. Mientras que el espaciado adecuado de las plantas indujo el desarrollo de ramas y aumenta el número de nudos y vainas por planta.

Andrade et al. (2002) consideran que el aumento del rendimiento de soja, en respuesta a filas más estrechas está relacionado con la mejora en la intercepción de la luz durante el PC. La reducción del espaciamiento entre líneas ha resultado en aumentos en el potencial de rendimiento y en el rendimiento de granos, ya que se produce un mejor uso del agua debido al sombreado más rápido del suelo por el canopeo, mejor distribución radicular, reducción de la competencia intraespecífica, mayor habilidad en la competencia frente a malezas, explotación uniforme de la fertilidad del suelo y mayor intercepción de la RS (Rambo et al., 2004).

Pires et al. (2000) destacan que la soja presenta características de alta plasticidad, es decir, tiene la capacidad de adaptarse a las condiciones ambientales y de manejo, por medio de modificaciones en la morfología de la planta y en los componentes del rendimiento. Este autor considera que la forma en que tales cambios se producen pueden estar relacionados con factores como la fertilidad del suelo, población de plantas y espaciamiento entre líneas, siendo importante sus interacciones para conocer cual arreglo conjunto de estas prácticas traería respuestas más favorables.

Díaz Zorita (2004) menciona que el espaciamiento óptimo se reduce con el incremento de la latitud. A mayores latitudes la menor estación de crecimiento limita la producción de biomasa y al reducir el espaciamiento se anticipa la cobertura del suelo incrementando la producción de biomasa. No todos los cultivares responden por igual al espaciamiento entre surcos, en ensayos realizados por Díaz Zorita (2004) en Argentina, determinó que los cultivares más precoces y con menos ramificaciones presentan mayor respuesta y la magnitud del incremento al reducir los espaciamientos de 75 a 30 cm puede ser de hasta el 30 %. A su vez, este autor menciona los efectos positivos de reducir el espaciamiento entre surcos sobre el control de malezas permitiendo una competencia temprana a las mismas con un rápido sombreado del suelo, presentando como limitaciones la reducción en la distancia entre surcos el vuelco y la mayor incidencia de enfermedades.

Las condiciones climáticas pueden determinar que el espaciamiento óptimo varíe entre años, se recomienda reducir el espaciamiento cuando el cultivar elegido para un ambiente y fecha de siembra no logra un crecimiento adecuado. Se reporta en Argentina que espaciamientos a 0,35 m o menores son adecuados para siembras muy tardías o muy tempranas con cultivares de ciclo corto (Díaz Zorita, 2004). Este autor menciona en evaluaciones realizadas en Uruguay que el distanciamiento entre hileras de siembra es más importante en los GM cortos y en fechas de siembra tardías, por la menor capacidad del cultivo en ramificar y compensar rendimiento. En GM III y IV recomienda siembras de 0,34 a 0,38 m y para GMs mayores distanciamientos desde 0,34 a 0,50 m entre hileras. Para los GMs cortos no recomienda distancias superiores a 0,38 m puesto que su crecimiento vegetativo no permite una intercepción adecuada de luz. En siembras tardías de diciembre se pueden utilizar distancias de 0,19 m entre líneas.

En evaluaciones realizadas por Ventimiglia (2014) en Argentina, utilizando dos GM (III y IV) determinó que es posible disminuir la densidad de siembra al acortar las

distancias entre hileras a 0,35 m producto del aumento en la intercepción de la radiación y la menor competencia por recursos. Asimismo, Girón et al. (2014) en evaluaciones de tres cultivares de GM III y IV, reportan una respuesta positiva de los rendimientos por la reducción de espaciamientos entre hileras (17,5 cm y 35 cm frente a 52,5 cm), tanto en fechas de siembra tempranas (octubre) como tardías (noviembre y diciembre), lo que aumenta el porcentaje de radiación interceptada y disminuye la competencia entre plantas. En tanto, Girón et al. (2015) obtuvieron mayores rendimientos al utilizar distancias de 0,40 m en siembras de noviembre para cultivares de GM III y IV, siendo 10 % superior al espaciamiento de 0,20 m.

De Bruin y Pedersen (2011) mencionan que en EE.UU. la tendencia ha sido disminuir la distancia entre hileras desde 0,7 m a los 0,38 m. La magnitud de la respuesta depende de muchas variables como la ubicación, el año, el cultivar, la fecha de siembra y el sistema de labranza. Estos autores mencionan la ventaja de reducir la distancia entre hileras en el espaciado más equidistante de las plantas, lo que conduce a un mayor desarrollo del área foliar y una mayor intercepción de la luz al comienzo de la temporada. Estos cambios en la formación del canopeo aumentan la tasa de crecimiento de los cultivos, la acumulación de MS y el rendimiento de granos (De Bruin y Pedersen, 2011).

Andrade et al. (2019) en EE.UU. encontraron diferencias positivas en el rendimiento al utilizar distanciamientos de 0,38 m frente a 0,76 m, aunque la magnitud depende de la región y las prácticas de manejo que influyen en la fase de cultivo VE-R3, dado por las fechas de siembra tardías y/o el uso de cultivares de GM temprana de ciclo más corto. Heatherly et al. (2002) en el medio Sur de EE.UU. reportan que bajo riego los tratamientos sembrados a 0,5 m fueron los de mayor rendimiento en la variedad de GM IV. En tanto, Holshouser y Whittaker (2002) en el Atlántico medio en EE.UU. determinaron que los cultivares de GM IV presentaron mayor índice de área foliar y rendimiento cuando el espaciamiento entre hileras se redujo de 0,46 m a 0,23 m en ausencia de sequía.

En evaluaciones realizadas por Masino et al. (2018) en Argentina, en soja de GM III y IV utilizando espaciamientos de 0,52 m, determinaron que el rendimiento disminuyó en aquellas parcelas que presentaron variabilidad temporal no uniforme entre plantas, en tanto la variabilidad espacial no uniforme entre plantas solo generó reducción en el rendimiento en el cultivar de GM más corto (III). En tanto, Gulluoglu et al. (2017) en Turquía, indican que el rendimiento de soja depende de la densidad de plantas y estuvo significativamente influenciado por el espaciado de las mismas, estos autores reportan que distancias de 0,7 m y 0,5 m son adecuadas para siembras de variedades de GM III ya que genera mayor desarrollo de área foliar.

Çalifikan et al. (2007) en Turquía, evaluando cultivares de GM III y IV, obtuvieron incrementos en el rendimiento superiores a 20 % al reducir el espaciamiento entre hileras desde 0,7 m a 0,5 m cuando el cultivo de soja era de siembra completa, en tanto, en soja de doble cultivo los incrementos en rendimientos fueron cercanos a 25 % y

60 % cuando se utilizaron espaciamientos de 0,5 m y 0,3 m destacando el incremento en la intercepción de luz, el cierre más temprano del canopeo y el incremento en el rendimiento del tallo principal. Asimismo, Kolarić et al. (2014) en Serbia, reportaron que espaciamientos entre hileras de 0,2 m registraron los mayores rendimientos de grano frente a distanciamientos de 0,45 m y 0,7 m para cultivares de GM adaptados a dicha región, en referencia a la suplementación con riego.

Pires et al. (2000) en Brasil, determinaron que la reducción en el espaciamiento de 0,4 m a 0,2 m, dado por la menor competencia entre plantas, principalmente al inicio del llenado de granos permite la obtención de rendimientos elevados ante condiciones favorables. Asimismo, Tourino et al. (2002) observaron un incremento en la productividad al reducir el espaciamiento entre líneas de 0,60 m a 0,45 m, esto genera un mayor cierre de las líneas y la uniformidad entre plantas contribuye a la reducción de vuelco y en la altura de las mismas, también se favorece el control de malezas. En cambio, Boquet (1998) considera que la fecha de siembra y la selección de cultivares son los factores más importantes para obtener elevados rendimientos en Luisiana, siendo el espaciado entre hileras menos significativo.

2.7. EL RIEGO SUPLEMENTARIO EN SOJA

2.7.1. Importancia del riego en soja

La aplicación de riego limitada y complementaria durante la temporada de crecimiento puede aumentar significativamente la productividad del agua y el rendimiento de la soja (Giménez et al. 2017a, Gajić et al. 2018, Jha et al. 2018). La utilización del riego es una de las prácticas más eficaces en la mejora de la productividad y la calidad de los granos, una de las ventajas de las áreas irrigadas es que no hay necesidad, entre las plantas, de competir por el suministro de agua (Kuss, 2006). En tanto, Maehler et al. (2003) señalan que la aplicación de riego permite aumentar el largo del período de llenado de granos y mantiene el área foliar verde por más tiempo para realizar fotosíntesis, propiciando mayor contenido de asimilados en los granos.

El riego aumenta significativamente el rendimiento cuando el cultivo está creciendo en suelos con déficit hídrico permanente o periódico (Montoya et al., 2017). En tanto, Lich et al. (2013) mencionan que el déficit moderado de agua en el suelo por cortos períodos de tiempo durante la etapa vegetativa generalmente no reduce el rendimiento de la soja, esto se debe a que la reducción de la tasa de crecimiento de los brotes puede ser seguida por crecimiento compensatorio durante períodos de lluvia. Sin embargo, un déficit hídrico más severo o a largo plazo puede llevar a reducciones en el rendimiento. Montoya et al. (2017) sostienen que el déficit de agua durante las etapas de ampliación de la vaina y llenado de granos tiene un efecto negativo significativo en el rendimiento final y en los componentes del rendimiento.

Las pérdidas de rendimiento en el periodo crítico, resultan de reducciones en el número de vainas por planta y disminuciones en los granos por vaina, afectándose de esa manera el principal componente del rendimiento que es el NG por superficie (Giménez, 2014a). En tanto, Andrade et al. (2000b) sostienen que dadas las características morfológicas y fisiológicas de la soja le otorgan capacidad para compensar daños causados por estrés hídrico, la posibilidad de ramificar, la extensa etapa de floración y la producción de un número de estructuras reproductivas superior a las que realmente concreta, son mecanismos que permiten compensar deficiencias hídricas.

2.7.2. Respuesta del cultivo al riego suplementario

El uso del riego suplementario aplicado durante las etapas más importantes, como la etapa reproductiva, permitiría maximizar el rendimiento, reduciendo la variabilidad entre años y aumentando la rentabilidad en climas templados y húmedos como el de Uruguay (Montoya et al., 2017). Estos autores, en evaluaciones de riego suplementario determinan que hay un efecto positivo en el crecimiento y desarrollo de la soja cuando se aplica durante la etapa reproductiva (R1-R8), donde se lograron incrementos en MS total y rendimiento de grano, lo que permitió la estabilidad del rendimiento del cultivo durante las etapas fenológicas claves (R1-R6).

De acuerdo con Montoya et al. (2017), la mejor estrategia de riego, que maximiza el rendimiento y el margen de ganancia, es proporcionar el 75 % del requerimiento de agua del cultivo entre las etapas R1 y R8, ya que las PP durante la etapa vegetativa permiten un crecimiento y desarrollo apropiado. Sweeney et al. (2003) evaluando la respuesta al riego entre R4, R5 y R6, reportan que la soja regada generó rendimientos 20 % superiores a los alcanzados por la soja sin riego. En tanto, Montoya et al. (2017), reportan una reducción de 35 % en rendimiento en soja sin riego comparando con los tratamientos irrigados. Giménez (2014a) sostiene que las deficiencias hídricas impuestas en el PC (R4-R6) provocaron disminuciones significativas en el rendimiento de soja. Se cuantificaron pérdidas de grano que variaron entre 44 y 50 %. En tanto, Eck et al. (1987) reportan reducciones de rendimiento de soja de 46 % cuando fue sometida a estrés hídrico entre R1-R2 y R4.5.

Giménez (2014a) en ensayos realizados en soja regada, registró producciones de MS de 8347 kg ha⁻¹ al estadio R6 en el primer año, mientras que en el segundo alcanzó los 16168 kg ha⁻¹ de MS a R6. El autor argumenta que las diferencias en cuanto a la producción por las diferencias en RS incidente y excesos de PP en el primer año, mientras que en el segundo año las condiciones climáticas presentaron menores PP y alta RS incidente. El estrés hídrico durante el PC provocó menor acumulación de MS afectando negativamente la TCC en dicha etapa y el principal componente del rendimiento, es decir el NG por m⁻². Asimismo, Andrade y Sadras (2000b) en experimentos con riego realizados en la región obtuvieron registros de 12000 kg ha⁻¹ aproximadamente de MS. En tanto, Acikgöz et al. (2013) en evaluaciones de diferentes cultivares y distancias entre hileras lograron acumulados de MS a R5 de 18252 kg ha⁻¹.

En ensayos realizados por Giménez (2017b) en soja, evaluando la respuesta a diferentes disponibilidades hídricas en diferentes etapas del desarrollo, registró que las mayores disminuciones del rendimiento ocurrieron con deficiencias hídricas acumuladas en la etapa vegetativa y durante el PC, variando un 30 % con respecto al testigo regado, el cual alcanzó 6,2 t ha⁻¹. La productividad obtenida es cercana a los rendimientos máximos posibles para los ambientes de producción del litoral Norte. El componente numérico del rendimiento más afectado por las deficiencias hídricas fue el NG por superficie, la plasticidad vegetativa y reproductiva característica de la soja, provoca que las disminuciones del rendimiento no sean mayores cuando las etapas con estrés alternan con etapas de bienestar hídrico.

En evaluaciones realizadas por Grasso y Montero (2011) en Paysandú, obtuvieron un rendimiento cercano a las 5 t ha⁻¹ para el tratamiento de bienestar hídrico, en tanto, la ocurrencia de deficiencias hídricas durante el PC provoca una disminución del rendimiento del 50 %. El componente numérico del rendimiento más afectado fue el NG por m⁻². Las diferencias entre el NG en los tratamientos con y sin riego se les atribuyen a la reducción en la TCC durante el PC debido a las deficiencias hídricas, por lo tanto la baja disponibilidad de agua no solo afectó el rendimiento sino también la acumulación de MS.

Canosa y Prieto (2013) en evaluaciones desarrolladas en Paysandú, determinaron que sin la ocurrencia de deficiencias hídricas durante el PC se producen elevados rendimientos de grano, con alta producción de MS y elevadas TCC, siendo el NG por m⁻² el componente numérico del rendimiento el que explicó los resultados alcanzados, mientras que el peso promedio de granos se mantuvo inalterado. Estos autores registraron rendimientos de hasta 6,2 t ha⁻¹ para el tratamiento de bienestar hídrico y 4 t ha⁻¹ en el tratamiento sometido a déficit hídrico en etapas vegetativas y PC, alcanzando valores de TCC durante el PC de 260 kg MS ha⁻¹ día⁻¹ y 125 kg MS ha⁻¹ día⁻¹ para los tratamientos de bienestar hídrico y de déficit hídrico en etapas vegetativas y PC respectivamente.

En evaluaciones llevadas a cabo por Foster y Rovegno (2015) en Paysandú, afirman que el bienestar hídrico durante el ciclo de la soja no asegura la concreción del potencial de rendimiento, donde se alcanzó un rendimiento de 4,6 t ha⁻¹. Las deficiencias hídricas intensas (AD menor a 20 %) en las fases vegetativas y durante la floración reducen hasta 35 % el rendimiento, lo que produce una menor acumulación de MS en el PC respecto al tratamiento de bienestar hídrico, esto repercute en un menor NG por m⁻². La TCC entre R4 y R6 fue similar entre tratamientos teniendo la misma un promedio de 94 kg ha⁻¹ día⁻¹.

Desclaux y Roumet (1996) consideran que el estrés por sequía desencadena un cambio temprano del desarrollo vegetativo a reproductivo en la planta, cada etapa reproductiva fue más corta bajo estrés. La etapa de llenado de granos y el aborto de granos comenzaron antes en plantas estresadas y la duración del período de maduración se redujo significativamente por el estrés en esta etapa, lo que llevó a una senescencia acelerada.

Desclaux et al. (2000) evaluando dos niveles de estrés hídrico, (30 y 50 % de AD) durante diferentes momentos del ciclo en soja, determinaron que el estrés generado durante R3-R5 ocasionó significativas reducciones en el número de vainas, en tanto, el estrés ocasionado en R5 produjo una reducción en el NG y el estrés tardío afecta el peso de granos. Los períodos precisos de estrés por sequía pueden afectar diferentes componentes morfológicos y de rendimiento.

García y García et al. (2010) en Georgia, EE.UU, estudiando el efecto de diferentes regímenes de riego durante el crecimiento del cultivo, en cuatro genotipos de soja (GM: V, VI, VII y VIII), reportan en general, un incremento en el rendimiento de 7,2 kg por cada mm de agua total recibida (lluvia + riego). También se obtuvieron diferencias entre los métodos de riego empleados (riego durante toda la temporada, riego durante floración y secano) en MS, altura de canopeo y máximo índice de área foliar. En relación a la eficiencia del uso del agua reportaron que el genotipo de GM V registró la menor eficiencia, siendo el genotipo de GM VI el de mejor respuesta cuando se regaron durante toda la temporada. Estos autores destacaron la importancia de la selección de cultivares como una estrategia clave para lograr rendimientos óptimos con un uso reducido de agua para riego suplementario.

En el Uruguay se han reportado incrementos de rendimiento sustancialmente mayores por efecto del riego. No obstante, ello fue observado contrastando tratamientos de riego de mayor volumen de agua con tratamientos que fueron protegidos de la lluvia durante el PC del cultivo (Giménez, 2014a). La importancia del agua de lluvia está dada por las condiciones que presenta la región, debido a que los suelos agrícolas tienen una capacidad de almacenaje de agua inferior a la que el cultivo de soja consume durante su ciclo (Sawchik y Ceretta, 2005).

Gajić et al. (2018) en Serbia, determinaron que la aplicación de un 65 % del riego completo en las etapas fenológicas más sensibles permite obtener la mayor eficiencia de uso del agua y el mayor rendimiento de grano. En tanto, Zhang et al. (2015) señalan que la irrigación contribuye a disminuir los impactos climáticos negativos, específicamente seca y calor extremos sobre el cultivo de soja. Asimismo, Sarzi Sartori et al. (2015) señalan que el riego en condiciones de humedad del suelo por debajo del 60 % de la capacidad de campo incrementa el rendimiento de grano de soja. Klocke et al. (1989) consideran que el suministro de riego avanzado el proceso de floración y en las primeras etapas de elongación de vainas puede recuperar de manera efectiva la mayor parte del rendimiento, similar a los cultivos que reciben riegos durante todo su ciclo.

Los efectos de la utilización de riego suplementario controlado fueron evaluados por Gava et al. (2016) en Brasil, donde los tratamientos se definieron en función de la evapotranspiración del cultivo. Estos autores determinaron que ante déficit hídrico severo se vio afectada la productividad del cultivo, en tanto, cuando el riego fue suministrado en momentos específicos del ciclo no hubo diferencias en relación al riego total, esto permite reducir el uso de agua sin perjudicar al cultivo. Gava et al. (2017) sostienen que la

suplementación con riego en Rio Grande do Sul, permite aumentos de hasta 60 % en el rendimiento.

Jha et al. (2018) en India, destacan que el riego suplementario incrementa la productividad del cultivo cuando se expone ante deficiencias hídricas en los períodos vegetativo y floración, evitando reducciones en MS y rendimiento de granos. Wegerer et al. (2015) en EE.UU. evaluaron el desempeño de GMs I a V bajo riego, determinaron que no hay una elección óptima de GM en condiciones de riego, siendo en todos los casos la soja irrigada la de mayor producción.

2.7.3. Interacciones entre el riego suplementario y prácticas de manejo asociadas al cultivo

El rendimiento potencial de la soja y los subcomponentes del rendimiento fueron evaluados por Maehler et al. (2003) en Rio Grande do Sul, mediante la aplicación de riego suplementario y el espaciamiento entre plantas, utilizaron dos cultivares de maduración temprana adaptados a dicha región, con distancias entre hileras de 0,2 m, 0,4 m y en forma alterna 0,2 m y 0,4 m bajo dos efectos de disponibilidad hídrica, riego y sin riego. El tratamiento irrigado alcanzó el mayor rendimiento, debido al mayor número de flores, vainas, granos por vainas y peso de grano, en tanto, no se reportaron diferencias entre los espaciamientos de hileras evaluados. En ensayos realizados por Rambo et al. (2003) evaluando la disposición de las plantas utilizando espaciamientos de 0,2 m y 0,4 m, en diferentes poblaciones (20, 30 y 40 plantas m^{-2}) obtuvieron que el rendimiento se vio afectado por el riego suplementario, y por la interacción del espaciamiento entre filas y la población. Estos autores reportaron que el espaciamiento de 0,2 m logró los mejores resultados con baja población de plantas en los tratamientos con riego suplementario, esta combinación atenuó la competencia inter plantas.

Maehler et al. (2003) determinaron que el riego suplementario permite obtener incrementos en rendimiento de grano de 39 % frente al cultivo en seco, con distanciamientos entre hileras de 0,2 m y 0,4 m. Estos autores sostienen que el efecto del riego produce un incremento en el tiempo a maduración, lo que resulta en un mayor período de llenado de granos. Rambo et al. (2003) en sus evaluaciones determinaron que los tratamientos irrigados incrementaron su rendimiento un 18 % frente al no irrigado, con mayor peso de granos, siendo este componente el más importante en la definición del rendimiento final del cultivo.

En tanto, Rambo et al. (2004) en Brasil, determinaron que es posible reducir la pérdida de rendimiento potencial a partir del estadio R5, lo que genera un mayor rendimiento de granos en R8, mediante la aplicación de riego suplementario y utilizando arreglos de plantas de 0,2 m de espaciamiento entre hileras cuando la población es de 20 plantas m^{-2} obteniendo diferencias en el rendimiento final frente a espaciamientos de 0,4 m y poblaciones mayores (30 y 40 plantas m^{-2}). Maehler (2000) en estimaciones realizadas con dos cultivares de soja, en función del régimen hídrico y arreglo de plantas, obtuvo mayor potencial de rendimiento en el tratamiento irrigado frente al no irrigado, lo que

resultó en mayor rendimiento de granos bajo irrigación. Sin embargo, este autor no observó diferencias significativas en el potencial de rendimiento entre espaciamientos de 0,2 m y 0,4 m entre líneas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

El ensayo se realizó en el campo experimental de riego de la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni” de la Facultad de Agronomía, ubicada sobre la ruta 3, km 363, en el departamento de Paysandú, Uruguay (32° 22’ S 58° 03’ O), durante el año agrícola 2017-18. El experimento se realizó sobre un suelo clasificado como Brunosol subéutrico típico perteneciente a la unidad San Manuel según la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay, incluida dentro de la formación Fray Bentos.

El cuadro 1 muestra las características hidrológicas principales del suelo donde se desarrolló el ensayo.

Cuadro 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
AB	0-70		289	178	111

Dap= Densidad aparente, CC= Capacidad de campo, PMP= Punto de marchitez permanente, CAAD= Capacidad de almacenaje de agua disponible.

3.1.1. Manejo experimental

El ensayo se sembró el 22 de noviembre de 2017, los cultivares utilizados fueron DM 4915 IPRO STS (hábito de crecimiento indeterminado, intacta) del GM IV y DM 6563 RSF IPRO (hábito de crecimiento indeterminado, intacta) perteneciente al GM VI. En V2 (Fehr y Caviness, 1977) se realizó el ajuste de la población con el objetivo de lograr una población final de 350.000 plantas ha⁻¹ en el cultivar DM 4915 y 300.000 plantas ha⁻¹ en el cultivar DM 6563 con el objetivo de que cada cultivar manifieste el potencial de rendimiento.

El cultivo se mantuvo libre de malezas, enfermedades y plagas. Para ello se realizaron tres aplicaciones de Glifosato a razón de 2 lt ha⁻¹ de producto comercial para controlar malezas, una aplicación de insecticida Engeo a razón de 0,2 lt ha⁻¹ de producto comercial para el control de chinches (*Nezara viridula*) y una aplicación de insecticida Clorpirifos a razón de 1 lt ha⁻¹ de producto comercial para el control de lagartas foliares (*Anticarsia gemmatalis* y *Rachiplusia nu*).

En el cuadro 2, se presenta el calendario de eventos fenológicos para las variedades de ambos GM.

Cuadro 2. Calendario de eventos fenológicos.

Fecha	GM	Estado fenológico	Días post emergencia
22/11/2017	IV-VI	Siembra	
30/11/2017	IV-VI	Emergencia	0
04/01/2018	IV	R2	36
18/01/2018	VI	R2	50
08/02/2018	IV	R4	71
22/02/2018	VI	R4	85
13/03/2018	IV	R6	104
21/03/2018	VI	R6	112
10/04/2018	IV	R8	132
16/04/2018	VI	R8	138

Para la aplicación de la metodología experimental se consideró el período comprendido entre los estadios R4-R6 (Fehr y Caviness, 1977) como el PC para la determinación del rendimiento.

3.1.2. Tratamientos

En cada tratamiento los factores de manejo estudiados fueron: la disponibilidad hídrica, el grupo de madurez y la distancia entre hileras, de acuerdo al siguiente detalle y denominación:

T1: RIEGO, GM IV y DH 0,2. = R IV 0,2

T2: RIEGO, GM IV y DH 0,4. = R IV 0,4

T3: RIEGO, GM VI y DH 0,2. = R VI 0,2

T4: RIEGO, GM VI y DH 0,4. = R VI 0,4

T5: SECANO, GM IV y DH 0,2. = S IV 0,2

T6: SECANO, GM IV y DH 0,4. = S IV 0,4

T7: SECANO, GM VI y DH 0,2. = S VI 0,2

T8: SECANO, GM VI y DH 0,4. = S VI 0,4

En el presente ensayo se entendió por bienestar hídrico a contenidos hídricos del suelo iguales o superiores a 40 % de AD en las etapas no críticas (ENC) e iguales o superiores a 60 % de AD en el PC. El GM IV estuvo representado por la variedad DM 4915 y el GM VI por la variedad DM 6563.

Los tratamientos fueron ubicados en 24 unidades experimentales, las mismas estuvieron conformadas por 10 hileras de cultivo de 5 m de longitud, sembradas a una distancia entre hileras de 0,2 m y 5 hileras de cultivo de 5 m de longitud sembradas a una distancia entre hileras de 0,4 m.

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

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

$$BH = R + PP - ETc$$

Siendo R= mm agregados de riego, PP= mm de lluvia y ETc= mm de evapotranspiración de cultivo, calculada por el método $ETc = ETo \times Kc$ (Allen et al., 1998). La ETo es la evapotranspiración del cultivo de referencia y Kc es el coeficiente de cultivo. La ETo fue calculada utilizando la ecuación de FAO P-M y los Kc fueron los recomendados por FAO.

3.2. DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO

3.2.1. Hipótesis biológica

La reducción de la distancia entre hileras de 0,4 a 0,2 m provoca incrementos en el rendimiento en la variedad de GM IV en condiciones de secano y no provoca incrementos en el rendimiento bajo riego. En la variedad del GM VI con modificaciones de la DH de 0,2 a 0,4 m no existen cambios en el rendimiento, independiente del régimen hídrico.

3.2.2. Diseño experimental

El diseño utilizado fue de Parcelas Divididas en Bloques (2x2x2), con ocho tratamientos y tres bloques. El factor de riego se evaluó en la parcela grande y los factores de GM y DH se representaron a través de la interacción entre estos en la parcela chica, siendo aleatorizada dentro del nivel de riego.

3.3. DETERMINACIONES REALIZADAS

3.3.1. Determinaciones realizadas durante el ciclo del cultivo

Se realizaron dos muestreos de MS en la etapa reproductiva, coincidiendo con los estadios R4 y R6 (Fehr y Caviness, 1977). Las determinaciones de MS consistieron en cortar a ras del suelo 1 m lineal de plantas por parcela, colocándose en estufa a una temperatura de 60 ° C hasta que el peso seco fuera constante. Los muestreos presentaban como objetivo evaluar la evolución de la MS y la determinación de la TCC durante el PC (R4-R6).

Se realizaron los BH de suelo, con la finalidad de estimar las pérdidas y ganancias de agua en el suelo y poder cuantificar la disponibilidad hídrica durante el desarrollo del cultivo y definir la lámina de riego, en los tratamientos regados. Además, se estimó la evolución del agua disponible (AD) para los tratamientos regados y de secano.

3.3.2. Determinaciones realizadas a cosecha

El rendimiento fue estimado en cada parcela al cosechar 18 m lineales cuando el espaciamiento entre hileras era de 0,2 m y 9 m lineales cuando el espaciamiento entre hileras era de 0,4 m, en los que se midió porcentaje de humedad del grano, peso de mil granos y peso total de cada muestra. La estimación de los componentes del rendimiento se realizó mediante la cosecha manual de 1 m lineal de plantas representativas de la hilera central de cada parcela para evitar el efecto “borde”. En el tallo principal se midió la altura de planta, el número de nudos fructíferos, el número de vainas y el NG.

3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados obtenidos fueron analizados a través del programa estadístico “SAS”. Este permitió la realización de:

Análisis de la varianza

Pruebas de Comparación Múltiple (Tukey) a 5 % de significancia.

3.5. CONDICIONES CLIMÁTICAS EN EL PERÍODO DEL CULTIVO

3.5.1. Precipitaciones registradas

En la figura 1, se presentan las PP mensuales registradas en el campo experimental de riego de la EEMAC durante el transcurso del cultivo y los valores promedio del período histórico 1981-2012 (elaborado en base a datos proporcionados por la Dirección Nacional de Meteorología). Se pudo determinar que en los meses de noviembre y diciembre las PP fueron menores a la media, 88 y 99 mm, respectivamente. En cambio, las PP de enero fueron superiores a la media en 45 mm, también fueron notorios los registros durante los meses de febrero y marzo de 10 y 35 mm respectivamente.

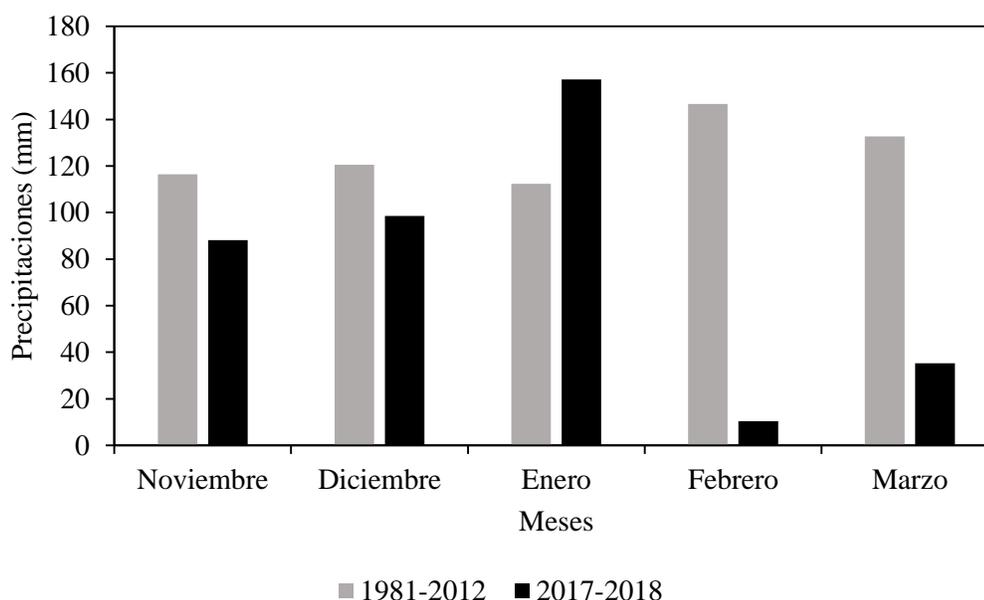


Figura 1. Precipitaciones (mm) registradas durante 2017-18 obtenida en el campo experimental de la EEMAC, Facultad de Agronomía y valores promedio de la serie histórica 1981 a 2012.

Fuente: elaborado en base a datos proporcionados por la MDN.DNM¹

Las PP de febrero y marzo fueron menores que el promedio de la serie histórica en 93 y 73 % respectivamente, cabe destacar que durante estos meses se ubicó el PC de

¹ MDN.DNM (Ministerio de Defensa Nacional. Dirección Nacional de Meteorología, UY). s.f. Precipitaciones período 1981-2012

determinación de rendimiento (R4 a R6). Las PP totales durante la fase del cultivo fueron de 390 mm siendo aproximadamente 40 % inferiores a la serie histórica considerada.

3.5.2. Temperatura media y máxima alcanzada

En la figura 2, se aprecia la temperatura media registrada durante el ciclo del cultivo y los registros del período 2002 a 2016. En la misma se observan valores mayores de temperatura media para los meses de diciembre, febrero, marzo y abril con respecto al promedio de la serie histórica, sin observar anomalías para noviembre y enero.

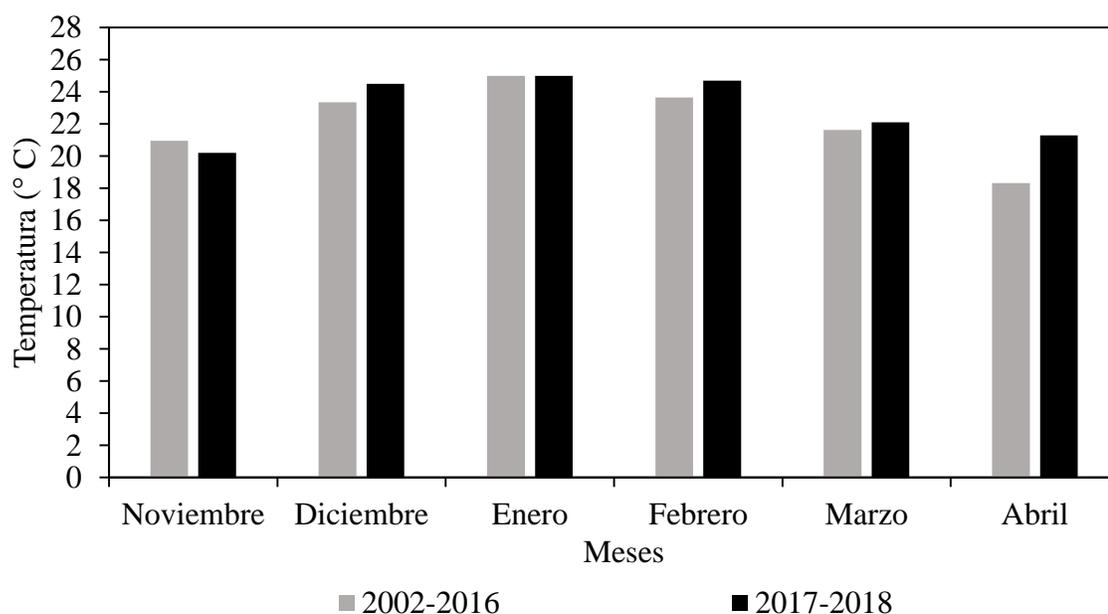


Figura 2. Temperaturas (° C) medias mensuales ocurridas durante el año agrícola 2017-18 y en la serie histórica 2002-2016, obtenidas de la estación meteorológica automática de la Facultad de Agronomía. EEMAC.

La figura 3 muestra la temperatura máxima que se alcanzó durante el ciclo del cultivo y los valores del período 2002 a 2016.

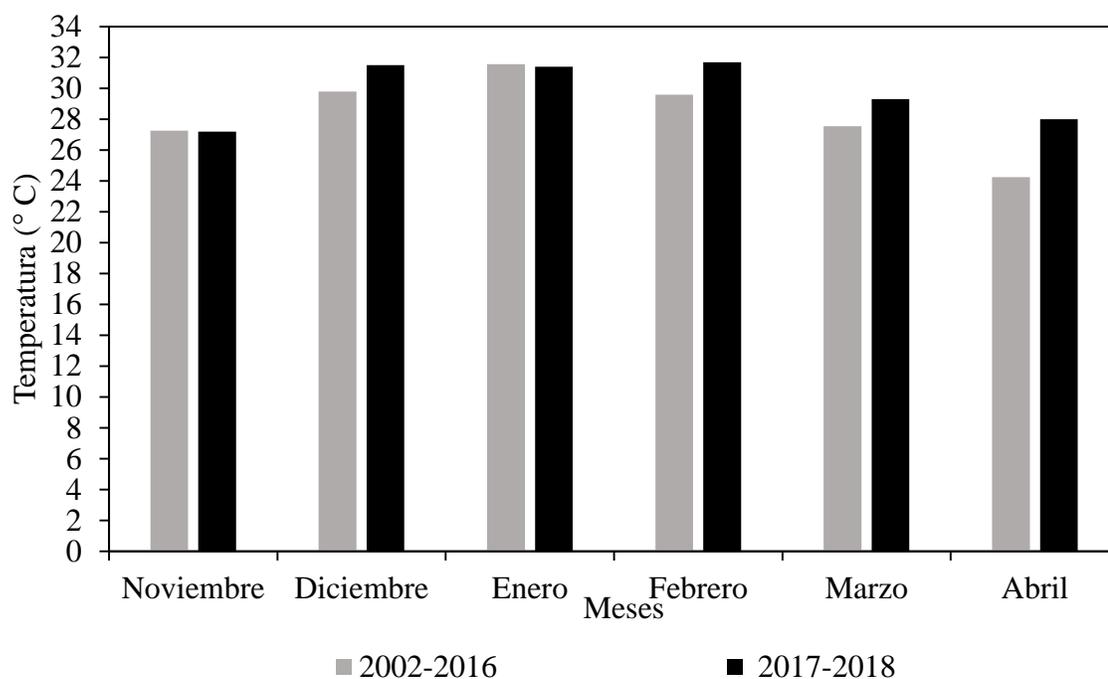
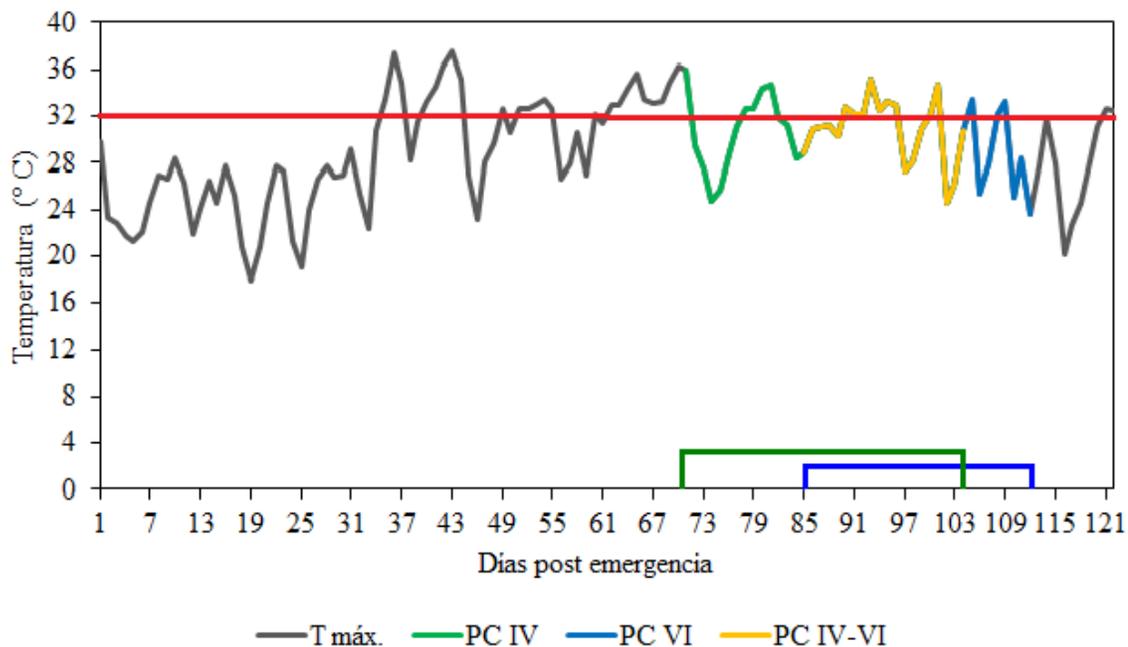


Figura 3. Temperaturas máximas promedio mensuales ocurridas durante el año agrícola 2017-18 y en la serie histórica 2002-2016, obtenidas de la estación meteorológica automática de la Facultad de Agronomía. EEMAC.

Las temperaturas máximas presentaron valores superiores al entorno de 10 % durante los meses de febrero y marzo en relación la serie considerada. Los incrementos fueron de 2,1 y 1,7 °C respectivamente superiores al promedio de la serie histórica.

En la figura 4, se muestran las temperaturas máximas diarias post-emergencia y durante los PC de ambas variedades evaluadas.



La variedad 4915 del GM IV (línea verde), la variedad 6563 del GM VI (línea azul) y ambas variedades (línea naranja). La línea roja separa temperaturas por encima y debajo de 32 °C.

Figura 4. Evolución de la temperatura máxima diaria en post emergencia y durante los períodos críticos (PC) de ambas variedades.

En la figura 4, se puede apreciar que durante el desarrollo del cultivo se registraron temperaturas moderadamente altas (25 °C a 32 °C) y muy altas (superiores a 32 °C).

3.5.3. Radiación solar incidente

En la figura 5, se aprecia la RS incidente del período 2002-16 y la RS registrada en la temporada 2017-18. En la misma se destacaron las mayores radiaciones de los meses de noviembre, febrero y marzo con respecto a la serie histórica.

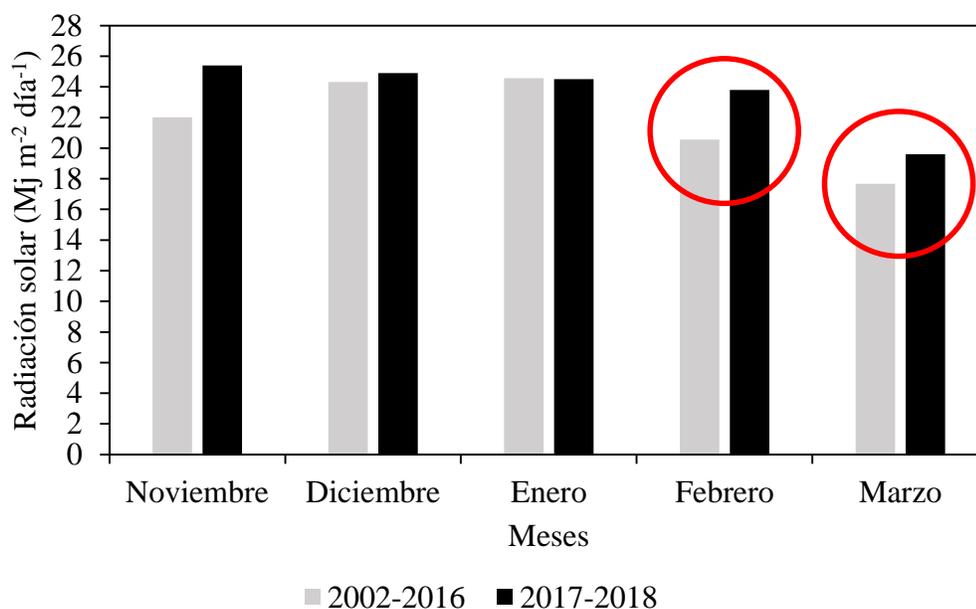


Figura 5. Radiación solar ($\text{Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) ocurrida durante el año agrícola 2017-18 y valores promedio de la serie histórica 2002-16, obtenidas de la estación meteorológica automática de la Facultad de Agronomía. EEMAC.

El incremento del 16 y 11 % de la RS ocurrida en febrero y marzo frente al promedio de la serie histórica marca la misma tendencia que las temperaturas.

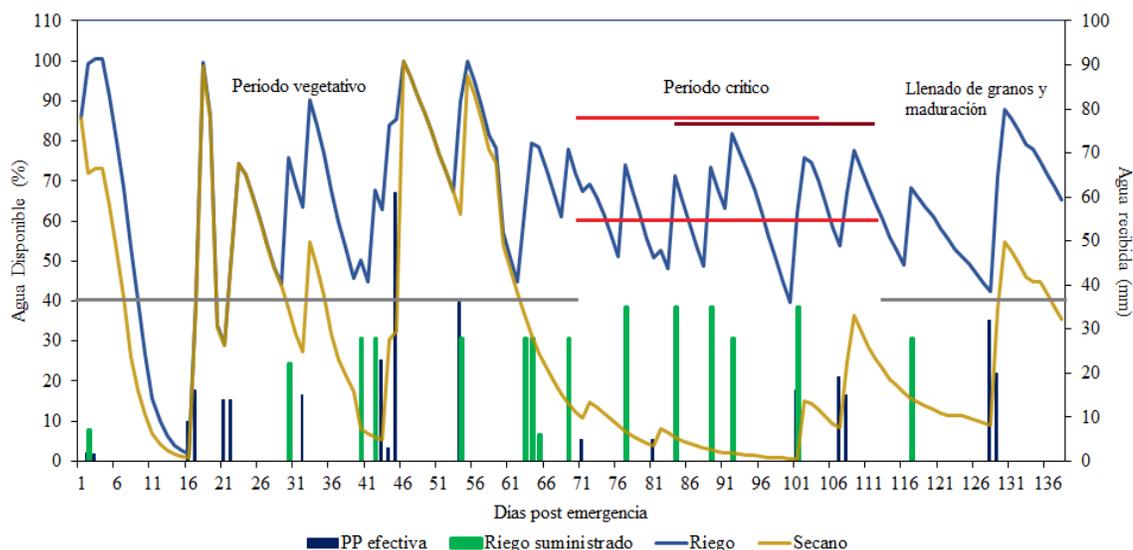
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO

4.1.1. Evolución del agua disponible en el suelo durante el ciclo del cultivo

En la figura 6, se muestra la evolución del AD en el suelo durante el ciclo del cultivo en los tratamientos evaluados con riego y en seco y los eventos de PP y de riego.

El contenido de AD en los tratamientos con riego en la mayor parte de la fase vegetativa estuvo por encima del 40 %, sin embargo, se puede apreciar un período corto por debajo de dicho umbral, el cual seguramente no afectó el crecimiento normal del cultivo, ya que se produjo en las etapas iniciales del ciclo (VC y V1-V2), coincidiendo esta apreciación con Lich et al. (2013). El AD durante el PC presentó grandes oscilaciones, pueden observarse descensos pronunciados por debajo del 60 %, estas variaciones registradas permiten determinar que el cultivo presentó ciertas deficiencias hídricas durante el PC de determinación del rendimiento, incluso en los tratamientos con riego. En el período de madurez, en los tratamientos con riego el AD estuvo por encima del 40 % fijado como valor umbral.



Las líneas grises indican el umbral de riego para las etapas no críticas (ENC) y la línea roja para el período crítico (PC). Las barras verdes indican los eventos de riego y las azules las precipitaciones.

Figura 6. Evolución del porcentaje de agua disponible en el suelo para los tratamientos desarrollados con riego y en seco en relación a los días post emergencia (DPE).

En la mayor parte del período vegetativo, las estrategias en seco presentaron similar contenido de AD que en riego. Se puede apreciar que hacia el final del período vegetativo el contenido de AD se reduce drásticamente en seco y se acentúa dicha

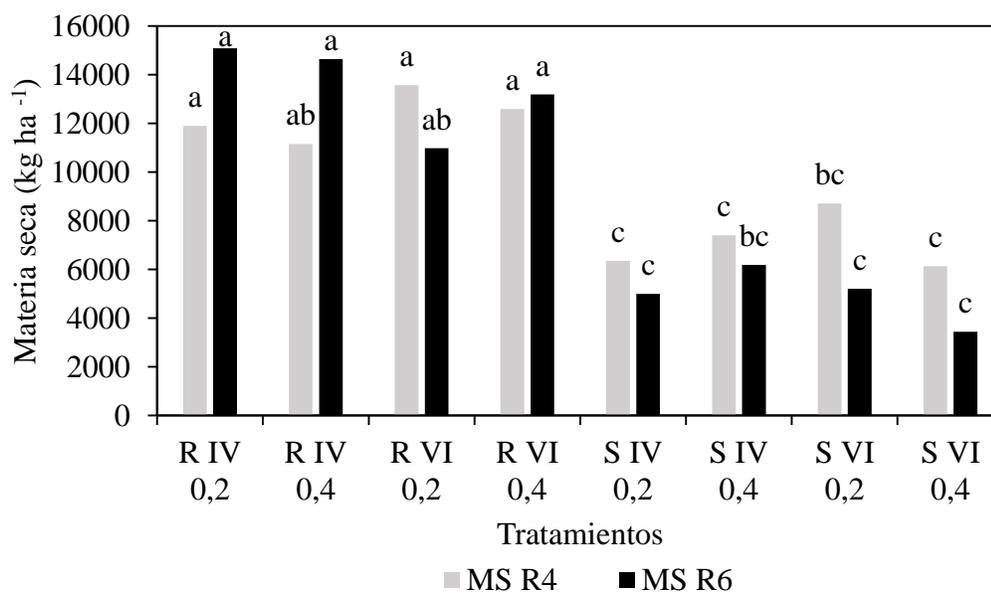
reducción durante el PC. En este período, el AD se vio reducida producto de las PP escasas registradas, las que durante ese periodo fueron de 29 mm. En ambas estrategias evaluadas, el AD se redujo en la etapa del ciclo de mayor sensibilidad a la ocurrencia de deficiencias hídricas. En secano, el cultivo fue afectado por el estrés generado por deficiencias hídricas, Liu et al. (2004), señalan que este es uno de los estreses abióticos más destructivos en soja.

Las estrategias con riego presentaron un suministro de agua adicional al secano durante el ciclo de 399 mm. En el PC el riego aplicado fue de 168 mm, etapa en la que ocurrieron PP insuficientes. En secano, las deficiencias hídricas fueron mayores al avanzar el ciclo, esto coincidió con el incremento de la sensibilidad del cultivo a la restricción hídrica durante la formación de vainas y llenado de granos (Mundstock y Thomas, 2005).

4.1.2. Parámetros de crecimiento del cultivo

4.1.2.1. Producción de materia seca

En la figura 7, se muestra la producción de MS en los diferentes tratamientos evaluados.



Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0.05$).

Figura 7. Materia seca (kg ha^{-1}) acumulada al inicio (R4) y final (R6) del PC para cada uno de los tratamientos evaluados.

En la figura 7, se presenta la producción de MS medida a principios del PC (R4) y al final de este (R6) en los diferentes tratamientos evaluados. En la MS a principios del

PC, se obtuvieron respuestas a la interacción entre el riego, el GM y la DH, se encontraron diferencias entre los tratamientos con riego y secano excepto en S VI 0,2 que no mostró diferencias con R IV 0,4. En secano se acumuló 58 % de la MS promedio que bajo riego. Estos resultados coinciden con la disponibilidad hídrica que presentó cada tratamiento hasta el inicio del PC, la misma estuvo por encima del umbral definido para las ENC.

En relación al efecto de la DH en la producción de MS en R4, ambas DH no mostraron diferencias significativas tanto en riego como en secano. Esto no coincide con lo reportado por De Bruin y Pedersen (2011), quienes señalan que al reducir la DH el desarrollo del área foliar fue mayor, esto está explicado por una mejora en la intercepción de luz, lo que se traduce en un aumento de la fotosíntesis y partición de fotoasimilados a los distintos órganos de la planta. La disponibilidad hídrica y las condiciones ambientales en referencia a la RS, estarían marcando una posible respuesta o no a la disminución de la DH. En condiciones de riego suplementario y con RS incidente no limitante, no se constató respuesta a las DH evaluadas en la acumulación de MS en ninguno de los materiales evaluados, contrariamente a lo señalado por Tourino et al. (2002), Díaz Zorita (2004) en referencia a la importancia de esta práctica para alcanzar la mayor área foliar lo más rápido posible. En cambio, Rambo et al. (2003) reportaron que la DH de 0,2 m logró los mejores resultados en los tratamientos con riego suplementario, lo cual atenuó la competencia entre plantas.

En relación a la MS medida al final del PC, se obtuvieron respuestas a la interacción entre el riego, el GM y la DH, donde se destacaron diferencias entre riego y secano. Las estrategias de secano acumularon 63 % menos MS promedio, en relación a las estrategias con riego. El descenso en la fijación de MS en secano comparado a lo sucedido en R4 se debió a que durante el PC se produjeron PP escasas, con valores de RS incidente promedio elevados de $21,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y temperaturas máximas superiores a $32 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Estas condiciones climáticas que produjeron demandas atmosféricas altas argumentan las diferencias en la MS fijada al final del PC entre las estrategias con riego y secano. Los resultados obtenidos reflejan el efecto positivo generado por la aplicación de riego, ya que como indican García y García et al. (2010), Montoya et al. (2017), se logran incrementos en MS durante el PC.

En condiciones de riego, el GM IV logró un incremento en la MS fijada durante el PC, siendo superior al GM VI. En el GM VI sembrado a 0,2 m, la MS acumulada fue 27 % menor a la alcanzada por el GM IV sembrado a 0,2 m. La respuesta obtenida en la acumulación de MS con riego en el GM VI pudo estar dada por el incremento en la competencia por el AD al reducir la DH, lo que produjo menor acumulación a R6. En este experimento, se interpretó que debido a la RS incidente elevada y las temperaturas altas tanto durante el PC como en el ciclo total (figuras 3, 4 y 5), no permitieron expresar el beneficio de la reducción de la DH en una mejor utilización de la RS y el AD, quizás si las condiciones del año agrícola hubieran sido diferentes se podría haber apreciado el efecto de reducir la DH como destacan Andrade y Sadras (2000a), Toledo (2016), quienes

afirman la importancia en la disminución en la competencia intraespecífica por luz, agua y nutrientes al mejorar la distribución espacial de plantas.

Las estrategias con riego lograron valores de fijación de MS en R6 que variaron entre 10978 y 15093 kg ha⁻¹ a R6. Estos registros, fueron inferiores a los obtenidos por Giménez (2014) de 16000 kg ha⁻¹ donde la RS incidente en el PC fue de 23,2 MJ m⁻² día⁻¹ siendo superior a los registros en el presente ensayo con 21,7 MJ m⁻² día⁻¹. En tanto, los resultados obtenidos fueron superiores a los obtenidos por Andrade y Sadras (2000a) de 12.000 kg ha⁻¹ en sus evaluaciones con riego. Se manifiesta la importancia del AD para el cultivo y la RS incidente durante el PC. El estrés hídrico que se generó en dicha etapa provocó menor acumulación de MS en los tratamientos de secano con respecto a los tratamientos regados.

En relación a las estrategias de secano, se produjo un descenso en la MS acumulada a R6 frente a R4, esto se relaciona con las demandas del cultivo, producto de las condiciones con temperaturas altas que se alcanzaron entre R4 y R6 conjuntamente con PP escasas. El escaso volumen de agua acumulado en los meses de febrero y marzo (figura 6) generó como consecuencia el anticipo de la senescencia foliar, reduciendo la MS a 37 % promedio frente a los tratamientos con riego.

En las estrategias con riego, se obtuvieron producciones de MS acumulada al final del PC, similares a los alcanzados en evaluaciones realizadas en la región, lo que resalta la importancia de la RS dada por las condiciones del año y el AD. En secano, el cultivo presentó, en esta temporada, condiciones ambientales adversas que explican la disminución en la acumulación de MS. Se puede concluir que para lograr mayores producciones de MS se requieren óptimas condiciones ambientales durante el PC, en relación al AD y valores de RS adecuados, ya que solamente con el riego no se garantizó las mejores producciones de MS debido a que el cultivo ubicó el PC en un ambiente que enfrentó una condición climática adversa.

4.1.2.2. Evolución de la tasa de crecimiento del cultivo durante el período crítico

En el cuadro 3, se muestra la TCC durante el PC para cada uno de los tratamientos evaluados.

Cuadro 3. Tasa de crecimiento para los diferentes tratamientos evaluados durante el PC.

Tratamientos	TCC durante el PC (kg ha ⁻¹ día ⁻¹)	Evolución de la MS (R4 – R6) (kg ha ⁻¹)
R IV 0,2	94	(11897 – 15093)
R IV 0,4	102	(11158 – 14639)
R VI 0,2	-92	(13567 – 10978)
R VI 0,4	21	(12590 – 13187)
S IV 0,2	-40	(6351 – 4993)
S IV 0,4	-36	(7400 – 6190)
S VI 0,2	-125	8708 – 5211)
S VI 0,4	-96	(6137 – 3440)

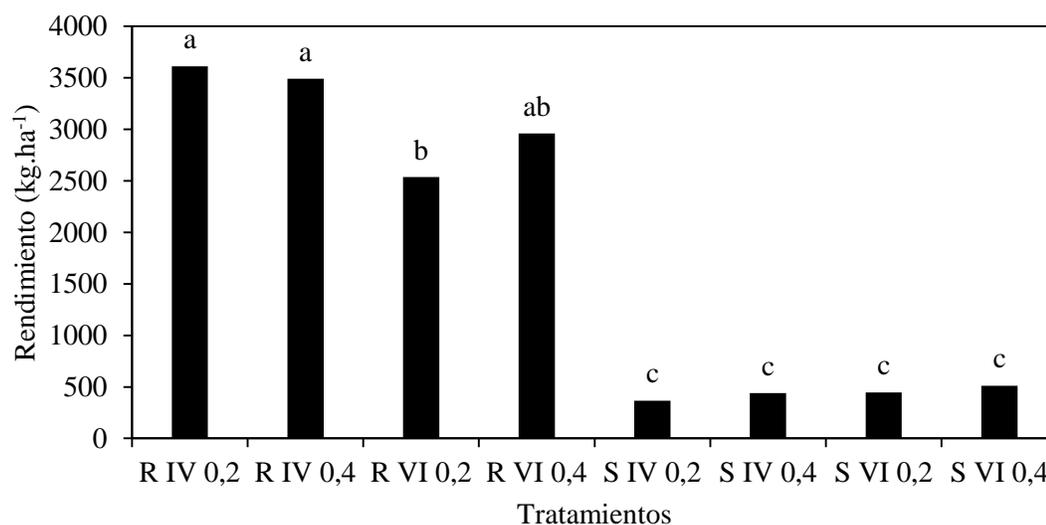
En condiciones de riego, el GM IV registró las TCC mayores. Dado que el ciclo en el GM IV fue de menor duración. Se interpretó que seguramente alcanzó el IAF crítico (no medido) en forma anticipada, y logró una captura de RS mayor esto permitió una TCC mayor como mencionan Girón et al. (2015). Estos autores, señalan que una TCC mayor durante el PC puede estar dada por un aumento en la fuente fotosintética. Se destacó la TCC negativa que presentó el R VI 0,2, esto se adjudicó a que este tratamiento alcanzó a R4 su máximo registro de MS con un posterior descenso a R6 (figura 7). Esto puede estar asociado a que el GM medio no logró interceptar la RS en forma eficiente y producto de la DH menor se generó un incremento en la competencia entre las plantas lo que redujo el crecimiento de las mismas. El GM VI sembrado a 0,4 m presentó el 21 % de la TCC que alcanzó el GM IV a la misma DH lo que representa un descenso en la TCC de 81 kg ha⁻¹ día⁻¹ dado por el bajo incremento de MS durante el PC en torno a 600 kg ha⁻¹, estos resultados evidencian el efecto del GM.

El GM IV con riego alcanzó una TCC promedio del entorno de $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$. Estos resultados, como se indicó se obtuvieron con una RS incidente promedio de $21,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ durante el PC. Las TCC alcanzadas con riego por el GM IV fueron similares a las obtenidas por Foster y Rovegno (2015) en Paysandú, en condiciones de RS incidente menor y de PP con excesos, por tanto, la RS no fue una limitante para el cultivo con riego. Se interpreta que la relevancia mayor para explicar los resultados la presentó el AD. En cambio, la TCC fue considerablemente menor a la obtenida por Grasso y Montero (2011), Canosa y Prieto (2013) en la misma localidad, estos autores lograron TCC durante el PC de $250 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ sin deficiencias hídricas. Estos resultados se obtuvieron con una RS incidente menor durante el PC en relación al presente ensayo y un contenido de AD mayor, por tanto, está determinado que la disponibilidad hídrica durante el PC es relevante para aumentar la TCC durante el PC.

Las estrategias en secano presentaron TCC en el PC negativas, esto se atribuye a las condiciones de déficit hídrico y al estrés térmico que se generó por temperaturas altas, en dicho período. Por tanto, seguramente el cultivo presentó alteraciones en la fuente fotosintética lo que provocó una reducción en la parte aérea con un incremento en la senescencia foliar que afectó a la producción de MS como determinaron Fernandes y Turco (2003). En el PC, las temperaturas fueron elevadas y el contenido de AD fue bajo (figuras 3, 4 y 6) durante la mitad de la duración del mismo. Esto incidió en forma negativa en la TCC. El estrés hídrico desencadenó una senescencia y abscisión de hojas acelerada, y como indican Desclaux y Roumet (1996), Fernandes y Turco (2003), Liu et al. (2004), Zarei et al. (2017), esto se reflejó en una menor acumulación de MS a R6 que a R4, y por tanto la TCC fue negativa.

4.1.3. Efecto de la disponibilidad hídrica y el grupo de madurez sobre el rendimiento

La figura 8, muestra el rendimiento en grano obtenido en cada uno de los tratamientos evaluados. En las estrategias con riego se logró un rendimiento promedio en torno a 3150 kg ha⁻¹ y en secano se alcanzó 441 kg ha⁻¹. Esto representa una diferencia de 86 % en el rendimiento, encontrándose diferencias significativas. En relación al efecto del GM, el cultivar del GM IV en promedio presentó un rendimiento de 1977 kg ha⁻¹, el cual fue 18 % superior al logrado por el cultivar del GM VI en el que se obtuvo 1613 kg ha⁻¹.



Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0.05$).

Figura 8. Rendimiento en grano (kg ha⁻¹) para los tratamientos evaluados.

En las estrategias con riego, el GM IV presentó un rendimiento mayor en relación al GM VI en torno a 23 %, esto coincide con lo establecido por Baigorri (2004) quien señala que en situaciones en las que las condiciones edáficas, climáticas e hídricas son propicias para el crecimiento del cultivo, los cultivares pertenecientes a GM cortos son los que expresan un potencial de rendimiento mayor. En referencia al GM VI, este registró el rendimiento más bajo para la DH de 0,2 m, el cual presentó una diferencia de 30 % en relación al GM IV con DH de 0,2 m con riego.

Los resultados alcanzados con riego fueron en promedio 56 % inferiores a los rendimientos máximos obtenidos, en el mismo suelo, en ensayos anteriores (Giménez, 2014a). Este comportamiento productivo se puede explicar por la disponibilidad hídrica durante el ciclo del cultivo, donde las PP totales fueron de 390 mm y 45 mm durante el PC, a su vez el riego fue deficitario en algunas etapas (figura 6), estos resultados concuerdan con lo mencionado por Vivan et al. (2013), Montoya et al. (2017) quienes afirman que el AD durante el PC tiene un efecto significativo en los componentes del

rendimiento. Se puede interpretar que las temperaturas elevadas de la temporada, principalmente durante el PC incidieron en los rendimientos obtenidos en este experimento, tanto con riego como en seco, estos resultados concuerdan con lo establecido por Egli (1998), Molino et al. (2007), Thuzar (2010), quienes señalan que en el período reproductivo las temperaturas altas afectan el crecimiento y por tanto el rendimiento final. Se puede determinar que cuando el ambiente presenta una condición extrema en relación a la disponibilidad hídrica, los GM medios no se comportan mejor que los GM cortos. A su vez, seguramente la combinación de déficit hídrico y estrés térmico generó alteraciones en la capacidad fotosintética. Estas condiciones desfavorables ocasionan según Egli y Bruening (2007) un incremento en la senescencia foliar afectando al rendimiento final, esto a su vez, incidió en la duración del llenado de granos.

En seco, el rendimiento se vio gravemente afectado debido al impacto negativo generado por las temperaturas altas en conjunto con el déficit hídrico que se prolongó desde previo al inicio del PC hasta la etapa de llenado de granos y maduración. Esta combinación afectó significativamente a ambos materiales siendo irrelevante el GM y la DH utilizada. En seco, los rendimientos promedios fueron muy bajos, incluso comparados con el promedio nacional, si bien a excepción del agua el manejo realizado a nivel nutricional y de control de malezas, enfermedades y plagas fue correcto, seguramente las condiciones ambientales mencionadas anteriormente condicionaron el comportamiento productivo, donde se cuantificaron valores de MS bajos y como consecuencia la TCC fue negativa.

4.1.4. Relación entre el rendimiento alcanzado y sus componentes

En el cuadro 4, se muestra el rendimiento y los componentes numéricos principales del rendimiento.

Cuadro 4. Rendimiento (kg ha^{-1}), número de granos por m^{-2} y peso de mil granos promedio (g) en los tratamientos evaluados.

Tratamientos	Rendimiento (kg ha^{-1})	Componentes numéricos del rendimiento	
		Número de granos por m^{-2}	Peso de mil granos (g)
R IV 0,2	3612 a	3252 a	166
R IV 0,4	3490 a	3187 a	167
R VI 0,2	2536 b	1948 b	169
R VI 0,4	2959 ab	2562 ab	174
S IV 0,2	366 c	700 c	124
S IV 0,4	439 c	458 c	119
S VI 0,2	446 c	470 c	128
S VI 0,4	511 c	732 c	129

Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0,05$).

Los resultados obtenidos permiten afirmar que el NG es el factor más importante en explicar la variación del rendimiento producida entre las estrategias evaluadas. Estos resultados coinciden con los obtenidos en varios ensayos (Grasso y Montero 2011, Canosa y Prieto 2013, Foster y Rovegno 2015) quienes reportaron un comportamiento similar en el NG por m^{-2} al evaluar la disponibilidad hídrica. El peso de mil granos no registró diferencias significativas. En las estrategias con riego, esto puede ser explicado por los eventos de PP que se registraron hacia el final del PC, lo que sumado al riego permitieron incrementar el AD por encima de 60 % como se aprecia en la figura 6.

Otro aspecto a destacar es la ausencia de compensación del peso de mil granos con riego, ya que ante la disminución en el NG no se observó un significativo aumento del peso promedio de granos. Estos resultados son diferentes a los obtenidos por Ergo (2013). En este ensayo, no se logró el efecto compensatorio del peso de granos cuando el cultivo se sometió a estrés térmico bajo riego, esto puede haber ocasionado que la tasa fotosintética haya reducido su actividad. Esto se ajusta a lo señalado por Ergo (2013), quien afirma que durante el llenado de granos el cultivo sufrió alteraciones en la tasa fotosintética, lo que generó una aceleración en el proceso de senescencia foliar que afecta a la fuente, repercutiendo sobre el rendimiento, lo que incidió en el peso de grano. A su vez, Westgate et al. (1989) destacan que el área foliar y la biomasa en el grano se reducen como consecuencia de bajas tasas fotosintéticas por la reducción en la suplencia de asimilados e inhibición del metabolismo del grano.

El rendimiento alcanzado en la estrategia con riego estuvo determinado por el efecto de las temperaturas altas durante el ciclo del cultivo (figura 4), siendo de impacto mayor durante los estadios reproductivos. Esto concuerda con lo mencionado por Thuzar (2010) quien señala la alta vulnerabilidad de los órganos reproductivos al estrés térmico. En tanto, en la estrategia en secano, ante la restricción hídrica y frente al estrés térmico el NG se redujo notoriamente en relación a los tratamientos con riego, se interpretó que tales condiciones mencionadas anteriormente ocasionaron un impacto negativo en el rendimiento que no fue compensado por el peso de mil granos, esto coincide con lo mencionado por Cencig y Villar (2008), Molino (2011), quienes destacaron el impacto de las temperaturas elevadas en ambos componentes numéricos del rendimiento, seguramente la supervivencia de vainas fue alterada como consecuencia del estrés térmico.

4.1.5. Subcomponentes del rendimiento

En el cuadro 5, se resumen los resultados obtenidos por cada tratamiento sobre el número de vainas por planta y el número de granos por vaina.

Cuadro 5. Número de vainas por planta y número de granos por vaina en los diferentes tratamientos evaluados.

Tratamientos	Número de vainas por planta	Número de granos por vaina
R IV 0,2	45 ab	1,96 a
R IV 0,4	48 a	1,96 a
R VI 0,2	31 b	1,78 ab
R VI 0,4	44 ab	1,86 a
S IV 0,2	15 c	1,34 bc
S IV 0,4	13 c	0,96 c
S VI 0,2	9 c	1,81 ab
S VI 0,4	13 c	1,85 a

En cada columna las letras iguales no difieren entre sí ($p < 0,05$).

Se observa en el cuadro 5 que en los tratamientos con riego existió una relación directa entre el número de vainas fijadas y el NG logrados por vaina. El GM IV registró un número de vainas por planta mayor, sin observarse diferencias en las diferentes DH evaluadas. En tanto, el GM VI mostró los registros menores en ambos subcomponentes a la DH de 0,2 m, esta reducción es responsable del rendimiento más bajo. En secano, el número de vainas por planta no presentó diferencias entre ambos materiales. Se interpreta que esto fue producto del ambiente extremo durante el PC, teniendo como resultado un número inferior de estructuras reproductivas que en las estrategias evaluadas con riego.

En referencia al número de vainas por planta, en las estrategias con riego, el GM IV evaluado a la distancia mayor fue el que registró el valor más elevado, siendo un 35 % superior al GM VI a la distancia más estrecha donde se manifestó el efecto del GM y de la DH. Se interpreta que la producción de vainas por planta en el GM VI con riego a 0,2 m está explicada por la acumulación de MS menor, teniendo como resultado una menor TCC, la cual incidió en un número reducido de vainas, coincidiendo con lo mencionado por Farias et al. (2007), quienes indican que las temperaturas elevadas tienen un efecto adverso sobre la TCC, provocando daños en floración y en la capacidad de retención de vainas.

La supervivencia de vainas en las estrategias con riego, se vio afectada por los episodios de temperaturas elevadas durante la fase reproductiva, esto podría estar explicado por eventos como el aborto floral o de vainas jóvenes. Esta respuesta concuerda con Prasad et al. (2006), Djanaguiraman y Prasad (2010) quienes afirman que eventos de estrés térmico durante la fase reproductiva incrementan la tasa de producción de etileno, teniendo como resultado una reducción significativa en el número de vainas fijadas. A su vez, esto coincide con lo reportado por Djanaguiraman et al. (2011), quienes determinaron que temperaturas diurnas de 38 °C durante floración generaron un incremento en la abscisión de flores, lo cual fue la razón de la disminución de vainas.

En secano, el número de vainas registró una reducción de 70 % frente al riego sin observarse los efectos del GM y de la DH. Esta respuesta está explicada por la ocurrencia de estrés hídrico y térmico durante el PC, los cuales generaron una reducción en el número de vainas. A su vez, estos resultados están explicados, según Egli y Bruening (2006), Lindsey y Thomson (2012) por el aborto de flores y vainas jóvenes como el mecanismo preponderante en definir el número final de vainas, incluso ante restricciones severas la mortandad de vainas de mayor tamaño puede incrementarse. En el mismo sentido, Masclaux-Daubresse et al. (2010), Gregersen et al. (2013), señalan que, las condiciones de estrés, como las temperaturas elevadas y la sequía durante la formación de granos, aceleran la senescencia de las hojas, lo que implica una pérdida de la capacidad fotosintética y, por lo tanto, acorta la duración del período de llenado de granos.

Por otro lado, la reducción en el número de vainas se asoció directamente con el NG logrados como señala Molino (2011), debido al estrés térmico y el secano. Según Kavanová et al. (2017), el número de vainas producidas y fijadas se explica por el estrés térmico durante el PC, lo cual repercute en el rendimiento, incluso en plantas que están en buenas condiciones de disponibilidad hídrica. Por otra parte, Desclaux et al. (2000), también señalan que la reducción en el NG fijados está asociada al estrés hídrico en el PC.

En el cuadro 6, se presenta el número de granos por metro cuadrado, el número de granos abortados por metro cuadrado y el porcentaje de granos abortados en función del manejo del agua.

Cuadro 6. Número de granos por m⁻² promedio, número de granos abortados por m⁻² promedio y el porcentaje de granos abortados promedio, para el promedio de las estrategias de riego y secano evaluadas.

	Número de granos por m ⁻² promedio	Número de granos abortados por m ⁻² promedio	Porcentaje de granos abortados promedio
Estrategias con riego promedio	2737	1000	37
Estrategias en secano promedio	594	293	50

En el ciclo se contabilizaron 43 de los 122 días del total con temperaturas superiores a 32 °C, representa el 35 % del total del ciclo. A su vez, la variedad de GM IV presentó durante el PC 14 de los 34 días con dichos valores, en tanto, el VI en el PC presentó 12 de los 28 días, esto representa el 41 y 43 % respectivamente. Según Boote et al. (1998), los incrementos en temperatura durante la fase de fructificación pueden reducir la fotosíntesis y el aporte de asimilados a las vainas promoviendo su aborto, coincidiendo con las condiciones que se presentaron durante la etapa reproductiva.

En las estrategias con riego, el porcentaje de granos abortados se explica por las temperaturas elevadas y las deficiencias hídricas no provocadas. En cambio, las estrategias en secano, redujeron ambos indicadores como consecuencia de las condiciones de estrés térmico e hídrico. Esta respuesta coincide con Molino (2011), quien señala que el número de granos logrados es afectado en forma directa por el efecto combinado de temperaturas elevadas y el secano durante el llenado de granos. En este mismo sentido, Dombos y Mullen (1991) mencionan que temperaturas altas entre 32 °C y 38 °C afectan directamente al número de granos logrados. Desclaux y Roumet (1996) también señalan que el aborto de granos comienza antes en plantas estresadas, efecto que se pudo apreciarse en secano.

4.1.6. Evapotranspiración del cultivo y eficiencia de uso del agua en los tratamientos con riego y secano

En la figura 10, se observa la evolución de la ET diaria estimada en el transcurso del ciclo de crecimiento para el promedio de los tratamientos con riego y secano.

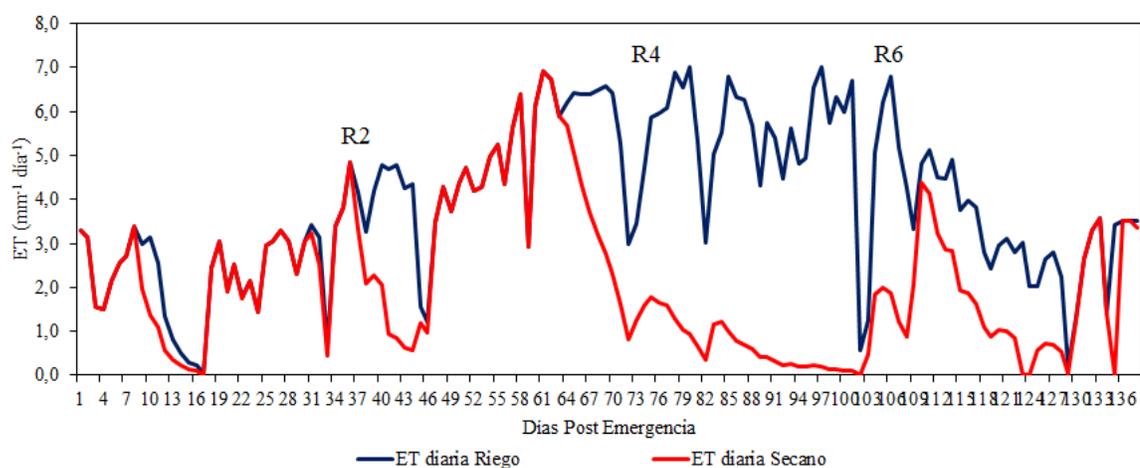


Figura 9. Evolución de la evapotranspiración (ET) diaria (mm día^{-1}) para el promedio de las estrategias con riego y en secano.

La ET presentó un comportamiento similar, en ambas estrategias, durante los primeros 60 días post-emergencia. El máximo consumo de agua coincide con el período de floración e inicio de llenado de granos, según Farias et al. (2007) es el período en el que el cultivo aumenta el área foliar hasta alcanzar su altura máxima y el IAF crítico. La ET durante la fase vegetativa no mostró diferencias importantes entre ambas estrategias de manejo del agua, ya que el cultivo no se expuso a un estrés severo.

En las estrategias con riego, se registró un descenso en la ET en torno a R4. Esto se ajustó al aumento de la demanda atmosférica del mes de febrero ocasionado por los mayores registros de la RS incidente y temperaturas máximas (figuras 3 y 5). En cambio, en secano se constató un descenso pronunciado de la ET previo al inicio del PC (R4). Estos resultados están explicados por la disponibilidad hídrica escasa, debido al nivel de agua en el suelo (figura 6). En riego, se produjeron oscilaciones durante el PC en la ET. Esto podría estar explicado por el efecto de deficiencias hídricas ocurridas en el PC.

4.1.6.1. Efecto del grupo de madurez sobre los parámetros hídricos

En el cuadro 7, se aprecia el rendimiento promedio en función del GM. El GM corto registró un rendimiento 23 % superior al GM medio. Estos resultados concuerdan con lo establecido por Ceretta et al. (2004) quienes señalan que en situaciones en las que se presentan deficiencias hídricas en los meses de febrero y marzo (figura 1), los cultivares de ciclo corto (GM IV) presentan desempeños mejores que los cultivares de GM VI. En relación a la ET no se registraron diferencias entre ambos GM durante el ciclo y el PC. Estos resultados no coinciden con lo mencionado por Giménez y García (2011), quienes determinaron que el GM VI presentó mayores registros de ETr dado por su mayor largo de ciclo. Esto puede estar explicado por las deficiencias hídricas en los tratamientos con riego. A su vez, la EUA lograda por el GM IV fue 25 % superior al GM VI. Estos resultados no coinciden con lo establecido por García y García et al. (2010), quienes determinaron que el GM VI presentó la mayor EUA cuando fue regado durante toda la temporada atribuyendo esta respuesta a la importancia del material genético.

Cuadro 7. Rendimiento promedio, evapotranspiración total, evapotranspiración promedio en el ciclo y en el PC y eficiencia de uso del agua en dos grupos de madurez.

Grupo de madurez	Rendimiento promedio (kg ha ⁻¹)	ET total (mm)	ET promedio en el ciclo (mm.día ⁻¹)	ET en el PC (mm)	ET promedio en el PC (mm.día ⁻¹)	EUA (kg.mm ⁻¹)
IV	3551 a	547	4,1	179	5,3	6,5
VI	2747 b	566	4,1	146	5,2	4,9

4.1.7. Rendimiento del cultivo con riego vs secano

4.1.7.1. Relación entre las estrategias evaluadas y los indicadores hídricos

En el cuadro 8, se muestran los resultados comparativos promedio entre las estrategias evaluadas. Se puede apreciar el efecto del riego en el rendimiento promedio. Las estrategias con riego registraron un rendimiento 86 % superior al logrado por las estrategias en secano, esto se explica por las mejores condiciones de disponibilidad hídrica. Este efecto se pudo apreciar en el NG m⁻² que lograron concretar (cuadro 6), esto concuerda con lo establecido por Giménez (2010) quien determinó una reducción en el NG m⁻² en condiciones de baja disponibilidad hídrica en el PC. En relación a la ET, las diferencias entre ambas estrategias tienen un gran componente ambiental, el cual se puede explicar por la disponibilidad hídrica limitada que presentó el cultivo en secano. El efecto fue más significativo en el PC, en secano esto estuvo determinado por las condiciones de RS, las temperaturas elevadas y las PP deficientes. En cuanto a la EUA, esta fue cuatro veces superior en los tratamientos con riego, el bienestar hídrico permitió resultados

altamente contrastantes en relación al secano debido a las características particulares de la temporada ya señaladas.

Cuadro 8. Rendimiento promedio, evapotranspiración total, evapotranspiración promedio en el ciclo y en el PC y eficiencia de uso del agua para el promedio de las estrategias con riego y en secano.

	Rendimiento promedio (kg ha ⁻¹)	ET total (mm)	ET promedio en el ciclo (mm día ⁻¹)	ET promedio en el PC (mm día ⁻¹)	EUA (kg mm ⁻¹)
Estrategias con riego promedio	3149 a	547	4,0	5,4	5,8
Estrategias en secano promedio	441 b	290	2,1	0,7	1,5

4.1.7.2. Características hídricas y productivas según la disponibilidad hídrica

Cuadro 9. Disponibilidad hídrica, materia seca al final del PC, número de granos por m⁻², peso de mil granos y rendimiento promedio para el promedio de las estrategias con riego y en secano.

	Estrategias con riego promedio	Estrategias en secano promedio
PP efectivas (mm)	596	306
Riego (mm)	359	0
Agua total (mm)	596	306
MS total (kg ha ⁻¹)	13474 a	4958 b
Número de granos por m ⁻²	2738 a	594 b
Peso de mil granos (g)	169	125
Rendimiento promedio (kg ha ⁻¹)	3149 a	441 b

En las estrategias con riego, el cultivo presentó una disponibilidad hídrica dos veces mayor frente al secano. En las estrategias de secano, las PP fueron insuficientes para satisfacer la demanda atmosférica, provocando deficiencias hídricas y como consecuencia

un impacto negativo en la MS acumulada. La respuesta en MS en seco fue 63 % menor frente a las estrategias con riego.

El volumen de riego representó el 60 % del volumen de agua total que recibieron las estrategias con riego, esto muestra la importancia de las deficiencias que ocurrieron esta temporada ya que en riego suplementario, en general, es el componente menor y las PP el mayor. El agua acumulada en el perfil previo a la siembra y de las PP durante el ciclo de cultivo fue sólo el 40 % del total.

En relación al componente numérico del rendimiento más importante en explicar la variación del rendimiento, en las estrategias con riego el NG m^{-2} logrado fue cuatro veces mayor frente al seco, siendo de relevancia menor el efecto producido en el peso de mil granos. En cuanto al rendimiento promedio, las estrategias con riego implicaron una relación de 7:1 frente al seco, esto se explica por las condiciones hídricas que presentó durante el ciclo de cultivo en una temporada caracterizada por las deficiencias hídricas y temperaturas elevadas, siendo el impacto negativo mayor durante el PC lo que incidió significativamente sobre el rendimiento.

5. CONCLUSIONES

En las estrategias con riego, la variedad perteneciente al GM IV presentó un mejor comportamiento productivo con un rendimiento mayor frente a la variedad de GM VI. La reducción en la DH no logró obtener mejoras en el rendimiento pese a que la disponibilidad hídrica fue en torno a 50 % de AD durante el ciclo de cultivo.

La hipótesis biológica no se logró comprobar que al reducir la DH de 0,4 a 0,2 m en la variedad de GM IV el rendimiento aumenta en condiciones de secano y se mantiene constante bajo riego. Se determinó que la DH no tuvo efecto en el GM IV en secano.

En secano, el efecto del estrés térmico y el déficit hídrico afectó a las dos variedades evaluadas siendo insignificante la DH utilizada en el rendimiento. En las condiciones hídricas evaluadas en secano, el GM VI no se comportó productivamente mejor que el GM IV.

Las condiciones de PP escasas y temperaturas muy elevadas, provocaron el aborto de granos, siendo este efecto mayor en secano. Si bien el riego implicó un rendimiento superior frente al secano, no se alcanzaron los registros anteriormente logrados en el mismo sitio por los registros de temperaturas máximas.

6. RESUMEN

Se desarrolló un experimento de soja (*Glycine max*, L.) en la estación experimental “Dr. M. A. Cassinoni” en Paysandú, Uruguay, en el verano 2017-18. Con el objetivo principal de evaluar la respuesta en rendimiento de soja en fecha de siembra temprana y con bienestar hídrico. El ensayo consistió en evaluar dos regímenes hídricos, dos variedades de GM contrastantes y dos DH y además las interacciones entre estos tres factores y como se vio afectado el rendimiento y sus componentes, así como la producción de MS y la TCC durante el PC. Se evaluaron 8 tratamientos: R IV 0,2; R IV 0,4; R VI 0,2; R VI 0,4; S IV 0,2; S IV 0,4; S VI 0,2; S VI 0,4. Se destacaron diferencias significativas con riego para la variedad DM 4915 de GM IV frente a la variedad DM 6563 de GM VI sin efecto de la DH utilizada. El máximo rendimiento logrado con riego fue de 3612 kg ha⁻¹ con R IV 0,2, el mínimo fue 2536 kg ha⁻¹ con R VI 0,2, mientras que el rendimiento promedio con riego fue 3149 kg ha⁻¹. En relación al secano, el máximo rendimiento fue 511 kg ha⁻¹ con S VI 0,4, el mínimo fue 366 kg ha⁻¹ con S IV 0,2, siendo el rendimiento promedio en secano 441 kg ha⁻¹. En relación al efecto de la DH sobre el rendimiento, no se encontraron diferencias en cuanto a esta variable de respuesta. La acumulación de MS presentó respuesta a la interacción entre los tres factores tanto en R4 como en R6. La TCC máxima en riego fue 100 kg ha⁻¹ con R IV 0,4, mientras que en secano todos los tratamientos registraron valores negativos. Por otro lado, se analizaron los componentes y sub-componentes del rendimiento. La variedad DM 4915 con riego obtuvo los mayores valores en cuanto a NG, en comparación a los logrados por la variedad DM 6563 lo que explicó las diferencias en el rendimiento, sin embargo no se encontraron diferencias para el peso de mil granos. El bajo crecimiento durante el PC del cultivo pone de manifiesto las características del año en que se desarrolló el experimento con una temperatura por encima de la media histórica y PP por debajo de la misma, por lo cual no se alcanzaron rendimientos potenciales al verse afectados los componentes del mismo.

Palabras clave: *Glycine max*; Riego; Grupo de madurez; Distancia entre hileras; Rendimiento; Fecha de siembra.

7. SUMMARY

A soybean experiment (*Glycine max*, L.) was developed in the experimental station “Dr. M. A. Cassinoni” in Paysandú, Uruguay, in the summer 2017-18. With the main objective of evaluating the response in soybean yield on early planting date and with water wellbeing. The trial consisted of evaluating two water regimes, two contrasting maturity group (MG) varieties and two row spacing and also the interactions between these three factors and how performance and its components were affected, as well as the production of dry matter (DM) and the growth rate of the crop during CP. Eight treatments were evaluated: R IV 0.2; R IV 0.4; R VI 0.2; R VI 0.4; S IV 0.2; S IV 0.4; S VI 0.2; S VI 0.4. Significant differences were highlighted with irrigation for the DM 4915 variety of MG IV versus the DM 6563 variety of MG VI without the effect of the row spacing used. The maximum yield achieved with irrigation was 3612 kg ha⁻¹ with R IV 0.2, the minimum was 2536 kg ha⁻¹ with R VI 0.2, while the average yield with irrigation was 3149 kg ha⁻¹. In relation to the dry land, the maximum yield was 511 kg ha⁻¹ with S VI 0.4, the minimum was 366 kg ha⁻¹ with S IV 0.2, the average yield in dry land being 441 kg ha⁻¹. Regarding the effect of row spacing on performance, no differences were found regarding this response variable. The accumulation of DM presented a response to the interaction between the three factors in both R4 and R6. The maximum crop growth rate average in irrigation was 100 kg ha⁻¹ with R IV 0.4, while in dry land all treatments registered negative values. On the other hand, components and sub-components of the performance were analyzed. The variety 4915 with irrigation obtained the highest values in terms of NG, compared to those achieved by the variety 6563 which explained the differences in yield, however no differences were found for the weight of one thousand grains. The low growth during the CP of the crop shows the characteristics of the year in which the experiment was carried out with a temperature above the historical average and PP below it, so that potential yields were not reached when the components thereof.

Keywords: *Glycine max*; Irrigation; Maturity group; Row spacing; Yield; Seedtime.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Açikgöz, E.; Sincik, M.; Wietgreffe, G.; Sürmen, M.; Çeçen, S.; Yavuz, T.; Erdurmu, C.; Göksoy, A. T. 2013. Dry matter accumulation and forage quality characteristics of different soybean genotypes. (en línea). Turkish Journal of Agriculture and Forestry. 37(1): 22 - 32. Consultado 2 dic. 2018. Disponible en <http://journals.tubitak.gov.tr/agriculture/issues/tar-13-37-1/tar-37-1-2-1204-58.pdf>
2. Andrade, F. H.; Aguirrezábal, L. A. N.; Rizzalli, R. H. 2000a. Crecimiento y rendimiento comparados. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, INTA/UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 61 - 96.
3. _____.; 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, INTA/UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 173-206.
4. _____.; Calvin, P.; Cirilo, A.; Barbieri, P. 2002. Yield responses to narrow rows depend on increased radiation interception. Agronomy Journal. 94:975-980.
5. _____.; Rattalino Edreira, J. I.; Mourtzinis, S.; Conley, S. P.; Ciampitti, I. A.; Dunphy, J.E.; Gaska, J. M.; Glewen, K.; Holshouser, D. L.; Kandel, H. J.; Kuveryga, P.; Lee, C. D.; Licht, M. A.; Lindsey, L. E.; McClure; M. A.; Naeve, S.; Nafziger, E. D.; Orłowski; J. M.; Ross, J.; Staton, M. J.; Thompson, L.; Specht, J. E.; Grassini, P. 2019. Assessing the influence of row spacing on soybean yield using experimental and producer survey data. Field Crops Research. 230:98-106.
6. Baigorri, H. 2004. Criterios generales para la elección y el manejo de cultivares en el cono Sur. In: Díaz Zorita, M.; Duarte, G. eds. Manual práctico para la producción de soja. Buenos Aires, Hemisferio Sur. pp 39-77.
7. _____. 2009. Manejo del cultivo de soja. In: García, F.; Ciampitti, I.; Baigorri, H. eds. Manual de manejo del cultivo de soja. Buenos Aires, Argentina, IPNI. p. 17.
8. Baker, J. T.; Allen, L. H.; Boote, K. J.; Jones, P.; Jones, J. W. 1989. Response of soybean to air temperature and carbon dioxide concentration. Crop Science. 29: 98-105.
9. Basal, O.; Szabó, A. 2018. Physiology and yield of three soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) cultivars different in maturity timing as affected by water

deficiency. *International Journal of Health and Life-Sciences*. 4(3):46-59.

10. Bazán, N. A. 2015. Estudio sobre la determinación del rendimiento en soja [*Glycine max* (L.) Merr] expuesta al efecto combinado de estrés térmico e hídrico. Tesis Ing. Agr. Córdoba, Argentina. Universidad Nacional de Villa María. 68 p.
11. Bernard, R. L. 1972. Two genes affecting stem termination in soybeans. *Crop Science*. 12(2):235-239.
12. Bodrero, M.; Andriani, J.; Bacigalupo, S.; Gerster, G.; Quijano, A.; Martignone, R.; Van Lacke, A. 2002. Factores limitantes del rendimiento y determinantes de su variabilidad en el cultivo de soja, campaña 2001-02. INTA. Para Mejorar la Producción de Soja. no. 16. 45 p.
13. _____. 2003. Algunos factores genéticos y ambientales que influyen sobre el rendimiento de la soja. *In: Jornada Nacional de Soja (2003, Mercedes). Memorias*. Montevideo, INIA. pp. 1-13 (Actividades de Difusión no. 325).
14. Boote, K. J.; Jones, J. W.; Hoogenboom, G. 1998. Simulation of crop growth: CROPGRO model. *In: Peart, R. M.; Curry, R. B. eds. Agricultural systems modeling and simulation*. New York, Marcel Dekker. pp. 651-692.
15. Boquet, D. J. 1998. Yield and risk utilizing short-season soybean production in the mid-southern USA. *Crop Science*. 38:1004–1010.
16. Boyer, J. S. 1982. Plant productivity and environment. *Science*. 218:443-448.
17. Çalifikan, S.; Arslan, M.; Ürem, I. 2007. The effects of row spacing on yield and yield components of full season and double-cropped soybean. *Turkish Journal of Agriculture & Forestry*. 31:147-154.
18. Canosa, G.; Prieto, C. 2013. Estudio del efecto de las deficiencias hídricas sobre el rendimiento de soja. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 59 p.
19. Castaño, J. P.; Ceroni, M.; Giménez, A.; Furest, J.; Aunchayna, R.; Bidegain, M. 2011. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009. (en línea). Montevideo, INIA. 40 p. (Serie Técnica no.193). Consultado 1 jul. 2018. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2538/1/18429021211104157.pdf>

20. Cencig, G.; Villar, J. 2008. Estrés térmico durante el llenado de granos de soja: efecto sobre el rendimiento. Información Técnica cultivos de verano. Campaña 2008. INTA. Publicación Miscelanea. no. 112: 92-95.
21. Ceretta, S.; Mandl, A. 2002. Adaptación de cultivares de soja en Uruguay. In: Jornada de Girasol y Soja (2002, La Estanzuela, Colonia). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 43-52 (Actividades de Difusión no. 297).
22. _____; Vilaró, D. 2003. Comportamiento de sojas de distinto grupo de madurez en Uruguay. In: Jornada Nacional de Soja (2003, La Estanzuela, Colonia). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 115-122 (Actividades de Difusión no. 325).
23. _____; Boutes, C.; Garrone, M.; Sastre, M. 2004. Soja: resultados experimentales de la red de ensayos en chacra, zafra 2003-2004 (2003, La Estanzuela, Colonia). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 1-13 (Actividades de Difusión no. 370).
24. _____; Sastre, M.; Rossi, C.; Stewart, S.; Castro, B.; Montaña, M.; Chevalier, D.; Rey, E. 2018. Nuevas variedades de soja-INIA: ampliando el rango de grupos de madurez en fase comercial. Revista INIA. no. 52: 21-23.
25. Dardanelli, J. L.; De La Casa, A. C.; Ateca, M. R.; Zanvettor, R.; Núñez Vázquez, F.; Salas, H. P. 1992. Validación del balance hidrológico versátil para la rotación sorgo-soja bajo dos sistemas de labranza. INTA. Publicación Miscelanea. no. 7: 20-29.
26. De Bruin, J. L.; Pedersen Agron, P. 2011. Effect of row spacing and seeding rate on soybean yield. *Agronomy Journal*. 100:704–710.
27. Desclaux, D.; Roumet, P. 1996. Impact of drought stress on the phenology of two soybean (*Glycine max* L. Merrill) cultivars. *Field Crops Research*. 46(3):61-70.
28. _____; Tung-Thanh, H.; Roumet, P. 2000. Identification of soybean plant characteristics that indicate the timing of drought stress. *Crop Science*. 40: 716-722.
29. Díaz Zorita, M.; Duarte, A. G. 2004. Manual práctico para la producción de soja. Buenos Aires, Hemisferio Sur. 256 p.
30. Djanaguiraman, M.; Prasad, P. V. V. 2010. Ethylene production under high temperature stress causes premature leaf senescence in soybean. *Functional Plant Biology*. 37: 1071-1084.

31. _____.; Prasad, P. V. V.; Boyle, D. L.; Schapaugh, W. T. 2011. High temperature stress and soybean leaves: leaf anatomy and photosynthesis. *Crop Science*. 51: 2125–2131.
32. Dombos, D. L.; Mullen, R. E. 1991. Influence of stress during soybean seed fill on seed weight, germination, and seedling growth rate. *Canadian Journal of Plant Science*. 71: 373-383.
33. Durán, A.; Califra, A.; Molfino, J. H. 1999. Suelos del Uruguay según soil taxonomy. (en línea). Montevideo, MGAP. 14 p. Consultado 20 nov. 2018. Disponible en http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/multimedia/1615_suelos_del_uruguay_segun_soil_taxonomy_0.pdf
34. Eck, H. V.; Mathers, A. C.; Musick, J. T. 1987. Plant water stress at various growth stages and growth and yield of soybeans. *Field Crops Research*. 17: 1-16.
35. Egli, D. B. 1988. Plant density and soybean yield. *Crop Science*. 28: 977-981.
36. _____.1998. Seed growth rate and seed fill duration: variation and regulation and yield components-regulation by the seed. *In: Seed biology and the yield of grain crop*. Madison, Wisconsin, CABI. pp. 38-112.
37. _____.; Bruening, W. P. 2006. Fruit development and reproductive survival in soybean: position and age effects. *Field Crops Research*. 98: 195-202.
38. _____.; Bruening, W. P. 2007. Accumulation of nitrogen and dry matter by soybean seeds with genetic differences in protein concentration. *Crop Science*. 47: 359–366.
39. Endres, V. C. 1996. Espaçamento, densidade e época de semeadura. *In: Soja: recomendações técnicas para Mato Grosso do Sul e Mato Grosso*. Dourados, EMBRAPA. Centro de Pesquisa Agropecuária do Oeste (Dourados, MS). pp. 82-85 (Circular Técnica no. 3).
40. Ergo, V. 2013. Estrés térmico y/o hídrico durante el llenado de grano en soja: impacto sobre el funcionamiento de la fuente y su efecto sobre el rendimiento. Tesis Ing. Agr. Córdoba, Argentina. Universidad Nacional de Córdoba. 65 p.
41. Evans, J. R. 1983. Nitrogen and photosynthesis in the flag leaf of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiology*. 72(2): 297-302.
42. Farias, J. R.; Nepomuceno, A. L.; Neumaier, N. 2007. Ecofisiologia da soja. EMBRAPA. Circular Técnica. no. 48: 1-9.

43. Fehr, W. R.; Caviness, C. E. 1977. Stages of soybean development. Iowa State University. Cooperative Extension Service. Special report no. 80. pp. 929-931.
44. Fernandes, E. J.; Turco, J. E. P. 2003. Evapotranspiração de referência para manejo da irrigação em cultura de soja. *Irriga*. 8: 132-141.
45. Foster, P.; Rovegno, F. 2015. Efectos de diferentes disponibilidades hídricas en distintas etapas fisiológicas de soja sobre el rendimiento. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 60 p.
46. Gajić B.; Kresović, B.; Tapanarova, A.; Životić, L.; Todorović, L. 2018. Effect of irrigation regime on yield, harvest index and water productivity of soybean grown under different precipitation conditions in a temperate environment. *Agricultural Water Management*. 210: 224-231.
47. García y García, A.; Persson, T.; Guerra, L. C.; Hoogenboom, G. 2010. Response of soybean genotypes to different irrigation regimes in a humid region of the southeastern USA. *Agricultural Water Management* 97: 981-987.
48. García, H.; Ferrarotto, M. 2009. Efecto del déficit hídrico sobre la acumulación de biomasa y nitrógeno en soja (*Glycine max*) inoculada con *Bradirhizobium japonicum*. (en línea). Aragua, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. pp. 21-27. Consultado 16 ago. 2018. Disponible en http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_agro/article/view/130/108
49. Gava, R. 2014. Os efeitos do estresse hídrico na cultura da soja (*Glycine max*, (L.) Merrill.). Tese Doutorado em Irrigação e Drenagem. Piracicaba, Brasil. Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 123 p.
50. _____.; Frizzone, J. A.; Snyder, R. L.; de Almeida, B. M.; de Freitas, P. S. L.; Rezende, R. 2016. Estratégias de manejo de déficit hídrico na irrigação da cultura de soja. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*. 10(3): 305-315.
51. _____.; Anselmo, J. L.; Neale, C. M. U.; Frizzone, J. A.; Leal, A. J. F. 2017. Different soybean plant populations under central pivot irrigation. *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering*. 37(3): 441-452.
52. Gerster, G.; Bacigaluppo, S. 2009. Cómo alcanzar altos rendimientos en soja. Para mejorar la producción. INTA. Publicación Miscelanea. no. 42: 63-67.

53. Gibson, L. R.; Mullen, R. E. 1996. Influence of day and night temperature on soybean seed yield. *Crop Science*. 36: 98-104.
54. Giménez, L. 2007. Comportamiento fenológico de diferentes grupos de madurez de soja (*Glycine max*) en Uruguay. Ubicación temporal del período crítico. *Agrociencia (Uruguay)*. 11(2): 1-9.
55. _____. 2010. Efectos de la disponibilidad hídrica en diferentes etapas de desarrollo de maíz y soja. In: Seminario Internacional: potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (1°, 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Boscana. pp. 29-37.
56. _____.; García Petillo, M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*. 15(2): 100-108.
57. _____. 2014a. Efecto de las deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo sobre el rendimiento de soja. *Agrociencia (Uruguay)*. 18(1): 53-64.
58. _____.; Puppo, L.; Bentancor, L.; Hayashi, R.; Sawchik, J.; García, C. 2014b. Riego en cultivos y pasturas. In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (3°, 2014 Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. pp. 3-4.
59. _____. 2017a. Respuesta del maíz y la soja a diferentes disponibilidades hídricas en distintas etapas de desarrollo. *Agrociencia (Uruguay)*. 21(2): 77-90.
60. _____.; Paredes, P.; Pereira, L. S. 2017b. Water use and yield of soybean under various irrigation regimes and severe water stress: application of AquaCrop and SIMDualKc models. *Water*. 9(6): 393.
61. Girón, P.; Justo, C.; Lardone, A.; Barroco, M.; Miranda, W. 2014. Comportamiento de cultivares de soja a distintos distanciamientos entre hileras y fechas de siembra. Buenos Aires, Argentina, INTA. 3 p.
62. _____.; Miranda, W.; Barroco, M.; Lardone, A. 2015. Evaluación de distintas fechas de siembra de soja en función de grupos de madurez y espaciado entre hileras. Buenos Aires, Argentina, INTA. pp. 43-48.
63. Grasso, J. P.; Montero, J. A. 2011. Efecto de diferentes disponibilidades hídricas sobre el rendimiento de soja. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 56 p.

64. Gregersen, P. L.; Culetic, A.; Boschian, L.; Krupinska, K. 2013. Plant senescence and crop productivity. *Plant Molecular Biology*. 82(6): 603–622.
65. Gulluoglu, L.; Bakalil, H.; El Sabagh, A.; Arioglu, H. 2017. Soybean managing for maximize production: plant population density effects on seed yield and some agronomical traits in main cropped soybean production. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*. 5(1): 31-37.
66. Heatherly, L. G.; Spurlock, S. R.; Elmore, C. D. 2002. Row width and weed management systems for early soybean production system plantings in the Mid-Southern USA. *Agronomy Journal*. 94: 1172-1180.
67. Heinemann, A. B.; Maia, A.; Dourado-Neto, D.; Ingram, K. T.; Hoogenboom, G. 2006. Soybean (*Glycine max* (L.) Merrill.) growth and development response to CO₂ enrichment under different temperature regimes. *European Journal of Agronomy* 24: 52-61.
68. Holshouser, D. L.; Whittaker, J. P. 2002. Soybean plant population and row-spacing effects on early soybean production systems in the Mid-Atlantic USA. *Agronomy Journal*. 94 (3): 603-611.
69. Inouye J.; Shanmugasundaram S.; Masuyama T. 1979. Effects of temperature and daylength on the flowering of some photoinensitive soybean varieties. *Japanese Journal of Tropical Agriculture*. 22 (4): 167-171.
70. Jha, P. K.; Kumar, S. N.; Ines, A. V. M. 2018. Responses of soybean to water stress and supplemental irrigation in upper indo-gangetic plain: Field experiment and modeling approach. *Field Crops Research*. 219 (15):76-86.
71. Kantolic A.; Slafer G. A. 2001. Photoperiod sensitivity after flowering and seed number determination in indetermined soybean cultivars. *Field Crops Research*. 72 (2): 109-118.
72. _____; Giménez, P. I.; De La Fuente, E. B. 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja. In: Satorre, E. H.; Benez 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, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 167-186.
73. Kavanová, M.; Rey, E.; Montaña, M.; Sastre, M.; Ceretta, S. 2017. Efecto de estrés térmico sobre la producción y aborto de vainas en soja. In: *Día de Campo de Soja (2017, La Estanzuela, Colonia)*. Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 9-11 (Actividades de Difusión no. 773).

74. Klocke, N. L.; Eisenhauer, D. E.; Specht, J. E.; Elmore, R. W.; Hergert, G. W. 1989. Irrigation soybeans by growth stages in Nebraska. *Applied Engineering in Agriculture*. 5 (3):361-366.
75. Kolarić, Lj.; Živanović, Lj.; Popović, V.; Ikanović, J.; Srebrić, M. 2014. Influence of inter-row spacing and cultivar on the productivity of soybean. *Biotechnology in Animal Husbandry*. 30 (3): 517-528.
76. Ku, Y. S.; Au-Yeung, W. K.; Yung, Y. L.; Li, M. W.; Wen, C. Q.; Liu, X.; Lam, H. M. 2013. Drought stress and tolerance in soybean. In: Board, J. E. ed. *A comprehensive survey of international soybean research - genetics, physiology, agronomy and nitrogen relationships*. New York, InTech. pp. 209-237.
77. Kuss, R. C. R. 2006. Populações de plantas e estratégias de irrigação na cultura da soja. *Dissertação Mestrado*. Santa Maria, Brasil. Universidade Federal de Santa Maria. 81 p.
78. Lich, M. A.; Wright, D.; Lenssen, A. W. 2013. Soybean response to drought agriculture and environment extension publications. (en línea). Iowa State University. Agriculture and Environment Extension. Publications no. 190. 4 p. Consultado 6 dic. 2018. Disponible en https://lib.dr.iastate.edu/extension_ag_pubs/190/
79. Lindsey, L.; Thomson, P. 2012. High temperature effects on corn and soybean. *C.O.R.N. News-letter*. 2012: 23–26.
80. Liu, F.; Jensen, Ch. R.; Andersen, M. N. 2004. Drought stress effect on carbohydrate concentration in soybean leaves and pods during early reproductive development: its implication in altering pod set. *Field Crops Research*. 86:1-13.
81. Maehler, A. R. 2000. Crescimento e rendimento de duas cultivares de soja em resposta ao arranjo de plantas e regime hídrico. *Dissertação Mestrado em Fitotecnia*. Porto Alegre, Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Faculdade de Agronomia. 108 p.
82. _____; Pires, J. L. F.; Costa, J. A.; Ferreira, F. G. 2003. Potencial de rendimento da soja durante a ontogenia em razão da irrigação e arranjo de plantas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 38 (2): 225-231.
83. Manavalan, L. P.; Guttikonda, S. K.; Tran, L. S. P.; Nguyen, H. T. 2009. Physiological and molecular approaches to improve drought resistance in soybean. *Plant Cell Physiology*. 50: 1260-1276.
84. Masclaux-Daubresse, C.; Daniel-Vedele, F.; Dechorgnat, J.; Chardon, F.; Gaufichon, L.; Suzuki, A. 2010. Nitrogen uptake, assimilation and

remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. *Annals of Botany*. 105(7): 1141–1157.

85. Masino, A.; Rugeroni, P.; Borrás, L.; Rotundo, J. L. 2018. Spatial and temporal plant-to-plant variability effects on soybean yield. *European Journal of Agronomy*. 98: 14–24.
86. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2018a. Anuario estadístico agropecuario. (en línea). Montevideo. 211 p. Consultado 26 nov. 2018. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/oficina-de-programacion-y-politica-agropecuaria/estadisticas-y-documentos/29-08>
87. _____. _____. 2018b. Encuesta agrícola invierno 2018. (en línea). Montevideo. 5 p. Consultado 1 oct. 2018. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/noticia/unidad-organizativa/oficina-de-programacion-y-politica-agropecuaria/13-07-2018/diea-presenta>
88. Miralles, D.; Windauer, L.; Gómez, N. 2004. Factores que regulan el desarrollo de los cultivos de granos. ¿Qué factores regulan el desarrollo? *In*: Satorre, E. H.; Benech, 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, UBA. Facultad de Agronomía. pp. 61-69.
89. Molino, J.; Vega, C. R. C.; Kantolic, A. 2007. Dinámica del perfil de determinación y supervivencia de vainas de soja ante estrés térmico por alta temperatura. *In*: Workshop Internacional (1º., 2007, Mar del Plata). *Eco fisiología vegetal aplicada al estudio de la determinación del rendimiento y la calidad de los cultivos de granos*. Mar del Plata, FAUBA/INTA/UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 134-135.
90. _____. 2011. Estrés térmico por alta temperatura en soja [*Glycine max* (L.) Merr.]: análisis de la dinámica de producción y fijación de vainas y su efecto sobre la determinación del rendimiento. Tesis Magister. Buenos Aires, Argentina. Universidad de Buenos Aires. 79 p.
91. Montoya, F.; García, C.; Pintos, F; Otero, A. 2017. Effects on irrigation regime on the growth and yield of irrigated soybean in temperature humid climatic conditions. *Agricultural Water Management*. 193: 30-45.
92. Mundstock, C. M.; Thomas, A. L. 2005. Soja: fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 31 p.

93. Pires, J. L. F.; Costa, J. A.; Thomas, A. L.; Maehler, A. R. 2000. Efeito de populações e espaçamentos sobre o potencial de rendimento da soja durante a ontogenia. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 35(8): 1541-1547.
94. Prasad, P.; Boote, K.; Allen, L.; Sheehy, J.; Thomas, J. 2006. Species, ecotype and cultivar differences in spikelet fertility and harvest index of rice in response to high temperature stress. *Field Crop Research*. 95: 398-411.
95. Rambo, L.; Costa, J. A.; Fernandes Pires, J.; Parciannelo, G.; Gutheil Ferreira, F. 2003. Rendimento de grãos da soja em função do arranjo de plantas. *Ciência Rural*. 33(3): 405-411.
96. _____.; _____.; _____.; _____.; _____. 2004. Estimativa do potencial de rendimento por estrato do dossel da soja, em diferentes arranjos de plantas. *Ciência Rural*. 34(1):33-40.
97. Saitoh, K. 2011. Effect of row-spacing and planting density on podding and yield performance of early soybean cultivar Enrei with reference to raceme order. *In: El-Shemy, H. ed. Soybean Physiology and Biochemistry*. Shanghai, InTech. pp. 275-288.
98. Sarzi Sartori, G.; Marchesan, E.; De David, R.; Petry, M.; Donato, G.; Cargnelutti Filho, A.; Ferreira da Silva, M. 2015. Rendimento de grãos de soja em função de sistemas de plantio e irrigação por superfície em Planossolos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 50(12): 1139-1149.
99. Satorre, M. 2003. *El libro de la soja*. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. 261 p.
100. Sawchik J.; Ceretta S. 2005. Consumo de agua por sojas de distintos grupos de madurez en diferentes ambientes de producción. *In: Jornada Técnica de Cultivos de Verano (2005, La Estanzuela, Colonia)*. Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 41-51 (Actividades de Difusión no. 417).
101. Shibles, R.; Weber, C. 1965. Leaf area, solar radiation interception and dry matter production by various soybean planting patterns. *Crop Science*. 5(6): 1606-1614.
102. Shon, T. K.; Haryanto, T. A. D.; Yoshida T. 1997. Dry matter production and utilization of solar energy in one year old *Bupleurum falcatum*. *Journal of Faculty of Agriculture*. 41: 133-139.
103. Sweeney, D. W.; Long, J. H.; and Kirkham, M. B. 2003. A single irrigation to improve early maturing soybean yield and quality. *Soil Science Society of America Journal*. 67: 235-240.

104. Thuzar, M.; Puteh, A. B.; Abdullah, N. A. P.; Lassim, M. M.; Jusoff, K. 2010. The effects of temperature stress on the quality and yield of soybean. *Journal of Agricultural Science*. 2: 172.
105. Toledo, R. 2015a. Ecofisiología de la soja. (en línea). Córdoba, Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Agrarias. 30 p. Consultado 11 ago. 2018. Disponible en <https://www.buscagro.com/biblioteca/Ruben-Toledo/Ecofisiologia-de-la-soja.pdf>
106. _____. 2015b. Soja: su ecofisiología y manejo. (en línea). Córdoba, Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Agrarias. 31 p. Consultado 4 dic. 2018. Disponible en <https://www.buscagro.com/biblioteca/Ruben-Toledo/Ecofisiologia-de-la-soja.pdf>
107. _____. 2018. Ecofisiología, rendimiento y calidad de soja. (en línea). Córdoba, Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Agrarias. 12 p. Consultado 22 ago. 2018. Disponible en <http://www.agro.unc.edu.ar/~wpweb/cereales/wp-content/uploads/sites/31/2018/07/Ecofisiologia-rendimiento-y-calidad-en-soja-.pdf>
108. Tourino, M. C. C.; Milanez de Rezende, P.; Salvador, N. 2002. Espaçamento, densidade e uniformidade de semeadura na produtividade e características agrônômicas da soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 37(8): 1071-1077.
109. Ventimiglia, L.; Torrens, L. 2014. Soja: incidencia del grupo de madurez, el espaciamento entre hileras y la densidad, en tres fechas de siembra, sobre el rendimiento. Pergamino, INTA. 6 p.
110. Vivan, G. A.; Peiter, M. X.; Robaina, A. D.; Barboza F. S.; Buske, T. C. Rendimento relativo da cultura da soja em função da lâmina de irrigação. *Irriga*. 18(2): 282-292.
111. _____.; Blumenthal, C.; Larroque, O.; Wrigley, C. 2002. Contrasting effects of heat stress and heat shock on kernel weight and flour quality in wheat. *Functional Plant Biology*. 29: 25-34.
112. Wegerer, R.; Schussler, J. R.; Reicosky, D. C.; Brenner, M. L. 1989. Effect of water deficits on seed development in soybean. II Conservation of seed growth rate. *Plant Physiology*. 91: 980-985.
113. _____.; Popp, M.; Hu, X.; Purcell, L. 2015. Soybean maturity group selection: Irrigation and nitrogen fixation effects on returns. *Field Crops Research*. 180: 1-9.

114. Whigham, D. K.; Minor, H. K. 1978. Agronomic characteristics and environmental stress. In: Norman, A. G. eds. Soybean physiology, agronomy and utilization. New York, Academic Press. pp. 77-118.
115. Zarei, Z.; Daneshian, J.; Khorgamy, A. 2017. Effect of zinc and salicylic acid foliar application on quantitative and qualitative characteristics of soybean under deficit irrigation conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*. 14(4):723-734.
116. Zhang, T.; Lin, X.; Sassenrath, G. F. 2015. Current irrigation practices in the central United States reduce drought and extreme heat impacts for maize and soybean, but not for wheat. *Science of the Total Environment*. 58:331-342.