

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

ESTUDIO DEL EFECTO DE LA POBLACIÓN SOBRE EL RENDIMIENTO EN
SOJA EN CONDICIONES HÍDRICAS NO LIMITANTES

por

Mauricio BUSTAMANTE
Alvaro ESPÍNOLA

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

MONTEVIDEO
URUGUAY
2015

Tesis aprobada por:

Director:

.....

Ing. Agr. Luis Giménez

.....

Ing. Agr. Sebastián Mazzilli

.....

Ing. Agr. Oswaldo Ernst

Fecha: 15 de diciembre de 2015

Autores:

.....

Héctor Mauricio Bustamante Silveira

.....

Alvaro Espínola Arnejo

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Agr. MSc. Luis Giménez quien fue nuestro director de tesis por ayudarnos y darnos la posibilidad de desarrollar este trabajo; a la Lic. Sully Toledo y al personal de biblioteca por su colaboración durante la realización del trabajo.

A Richard Arévalo, Gastón Canosa, Federico Rovegno, Santiago Alcorta, Facundo Pessano, Paula Foster, Vittorio Praderio por su colaboración y disposición durante el trabajo de campo, y su colaboración en materiales. Y a los funcionarios del laboratorio de la EEMAC.

Especialmente a mi familia y amigos por el constante apoyo y por estar siempre durante todo este proceso.

A todos aquellos compañeros y amigos que conocimos a lo largo de la carrera, quienes quedan en nuestro recuerdo, junto a todas las experiencias vividas. Especialmente a la generación EEMAC 2013 y en particular a la barra del pabellón 2.

Alvaro

En primer lugar agradecer a nuestro tutor Luis Giménez por permitirnos y ayudarnos a realizar este trabajo. Al personal de biblioteca de Facultad de Agronomía y a la Lic. Sully Toledo por sus aportes.

Gracias a los compañeros y amigos que me acompañaron en estos años de Facultad, especialmente a la generación 2013 de la EEMAC de donde me llevo grandes amigos.

Y principalmente agradecer a toda la gente que me ha apoyado en estos años, especialmente a mi familia que sin su apoyo hubiera sido imposible lograr este sueño. Gracias por estar siempre y ser un sostén fundamental para mí en los momentos difíciles, por no dejarme bajar los brazos y estar incondicionalmente.

Mauricio

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. PRODUCCIÓN DE SOJA EN URUGUAY.....	2
2.2. CARACTERÍSTICAS DEL AMBIENTE DE PRODUCCIÓN.....	2
2.2.1. <u>Temperatura del aire</u>	2
2.2.2. <u>Heliofanía</u>	3
2.2.3. <u>Precipitaciones</u>	3
2.2.4. <u>Evapotranspiración</u>	4
2.3. LIMITANTES PARA LA PRODUCCIÓN DE SOJA EN EL URUGUAY.....	4
2.4. CARACTERÍSTICAS ECOFISIOLÓGICAS.....	5
2.4.1. <u>Principales estados de desarrollo de soja</u>	5
2.4.1.1. Estados vegetativos.....	6
2.4.1.2. Estados reproductivos.....	6
2.5. DETERMINANTES AMBIENTALES DEL RENDIMIENTO.....	7
2.5.1. <u>Temperatura</u>	7
2.5.2. <u>Requerimientos hídricos</u>	7
2.5.3. <u>Radiación solar</u>	8
2.5.4. <u>Fotoperíodo</u>	9
2.6. CRECIMIENTO DEL CULTIVO.....	9
2.6.1. <u>Producción de materia seca</u>	9
2.6.2. <u>Tasa de crecimiento</u>	10
2.6.3. <u>Índice de cosecha</u>	11
2.7. DENSIDAD DE SIEMBRA.....	11
2.7.1. <u>Recomendaciones de densidad de siembra</u>	12
2.7.2. <u>Densidad de siembra y rendimiento</u>	13

2.8. INTERCEPCIÓN DE RADIACIÓN SOLAR Y DEPOSICIÓN DE MATERIA SECA.....	14
2.9. MECANISMO DE COMPENSACIÓN CON LA VARIACIÓN EN LA POBLACIÓN DE PLANTAS.....	16
2.9.1. <u>Componentes del rendimiento</u>	17
2.9.1.1. Número de nudos.....	18
2.9.1.2. Número vainas y granos.....	18
2.9.1.3. Peso de grano.....	20
2.10. DENSIDAD DE SIEMBRA Y ALTURA DE PLANTA.....	21
2.11. DENSIDAD DE SIEMBRA Y FACTORES DEL AMBIENTE Y MANEJO.....	21
2.11.1. <u>Densidad óptima y disponibilidad de agua y nutrientes</u>	21
2.11.2. <u>Densidad óptima y fecha de siembra</u>	23
2.11.3. <u>Densidad óptima y elección de cultivar</u>	24
2.11.4. <u>Interacción entre población y distancia entre hileras</u>	25
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	27
3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO	27
3.1.1. <u>Manejo del experimento</u>	27
3.1.2. <u>Tratamientos</u>	28
3.2 DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO	29
3.2.1. <u>Hipótesis biológicas</u>	29
3.2.2. <u>Hipótesis estadísticas</u>	29
3.2.3. <u>Diseño experimental</u>	29
3.3. DETERMINACIONES REALIZADAS	31
3.3.1. <u>Determinaciones durante el ciclo del cultivo</u>	31
3.3.2. <u>Determinaciones a cosecha</u>	31
3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	31
3.5. CONDICIONES CLIMÁTICAS EN EL PERÍODO DEL CULTIVO	32
3.5.1. <u>Precipitaciones</u>	32
3.5.2. <u>Radiación solar incidente</u>	33

4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	35
4.1. DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS DEL EXPERIMENTO.....	35
4.1.1. <u>Parámetros de crecimiento</u>	35
4.1.1.1. Materia seca acumulada a inicio y final del período crítico.....	35
4.1.1.2. Materia seca acumulada por planta a inicio y final del período crítico.....	37
4.1.1.3. Efecto de la población sobre la tasa de crecimiento durante el período crítico.....	38
4.1.1.4. Relación entre TCP y número de granos por planta.....	40
4.1.2. <u>Efecto de la población sobre rendimiento</u>	42
4.1.2.1. Relación entre el rendimiento y sus componentes.....	44
4.1.3. <u>Efecto de la población sobre los sub-componentes de rendimiento</u>	47
4.1.3.1. Número de vainas y número de nudos fértiles.....	47
4.1.4. <u>Efecto de la población sobre la altura de planta</u>	50
5. <u>CONCLUSIONES</u>	52
6. <u>RESUMEN</u>	53
7. <u>SUMMARY</u>	54
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	55

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Características hidrológicas del suelo	27
2. Calendario de eventos fenológicos.....	28
3. Radiación solar incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) durante el ciclo del cultivo y la media de la década anterior	36
4. Número de granos por metro cuadrado y peso promedio de granos (mg) en los diferentes tratamientos evaluados.....	44
5. Número de granos por planta en los diferentes tratamientos evaluados	46
6. Número de vainas por m^2 , número de nudos fértiles por m^2 , número de vainas por planta y número de nudos por planta, en los diferentes tratamientos evaluados.....	47
7. Efecto de la población sobre la altura de planta a inicios del PC	50
 Figura No.	
1. Precipitaciones ocurridas durante 2013-2014	32
2. Radiación solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) ocurrida durante el año Agrícola 2013-14 y valores promedio de la serie histórica 2002-12	33
3. Materia seca (kg ha^{-1}) depositada a inicio y final del período crítico en los diferentes tratamientos evaluados. Las columnas con letras iguales no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).....	35
4. Materia seca (g planta^{-1}) depositada a inicio y final del período crítico en los diferentes tratamientos evaluados. Las columnas con letras iguales no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey)	37
5. Tasa de crecimiento por planta ($\text{g pl}^{-1} \text{ día}^{-2}$) entre inicio y fin del período crítico para los diferentes tratamientos evaluados. Las columnas con letras iguales no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).....	39
6. Relación entre la tasa de crecimiento por planta ($\text{g pl}^{-1} \text{ día}^{-2}$)	

durante el período crítico (R4-R6) y la variación en la población (plantas/m ²).	40
7. Número de granos por planta y tasa de crecimiento por planta (g pl ⁻¹ día ⁻²) entre inicios (R4) y fin (R6) del período crítico para los diferentes tratamientos evaluados. Las columnas con letras iguales no difieren entre sí (p<0.05; Tukey)	41
8. Relación entre la tasa de crecimiento por planta (g pl ⁻¹ día ⁻²) durante el período crítico (R4-R6) y el número de granos (granos/planta)	42
9. Rendimiento en grano (kg ha ⁻¹) en los diferentes tratamientos evaluados. Las columnas con letras iguales no difieren entre sí (p<0.05; Tukey).....	43
10. Rendimiento por planta según el número de plantas por metro cuadrado ...	45
11. Número de granos por planta en función del número de plantas por metro cuadrado	47
12. Número de vainas por planta en función del número de plantas por metro cuadrado	49

1. INTRODUCCIÓN

El área de siembra de soja en el país ha tenido un importante incremento en los últimos años pasando de 12.000 ha en la zafra 2000-01 a más de 1.321.000 ha en el año agrícola 2013-14 (MGAP. DIEA, 2014). Si bien el crecimiento en área sembrada resultó en un aumento marcado en la producción, no fue acompañado por un incremento significativo en el rendimiento, el cual presenta un estancamiento y una elevada variabilidad entre años, debido principalmente a la insuficiente y altamente inestable disponibilidad hídrica. Esto indica la necesidad de evaluar y revisar las principales limitantes para la producción agrícola estival en el país. El desafío es achicar la brecha entre los rendimientos actuales y los rendimientos alcanzables (García, 2009).

Asimismo, en los últimos años la caída del precio de la soja por diversos factores de mercado ha generado una disminución en la rentabilidad del cultivo. Esto ha llevado a la necesidad de disminuir los costos y aumentar el rendimiento con el objetivo de lograr un aumento de los beneficios. Un uso efectivo de las tecnologías existentes mediante buenas prácticas de manejo así como la utilización ajustada de los insumos.

El riego suplementario es una alternativa tecnológica en los sistemas de producción agrícolas para incrementar los rendimientos y disminuir su variabilidad, asimismo permitiría reducir la brecha entre los rendimientos actuales y los rendimientos alcanzables y por ende mejorar los márgenes económicos del cultivo. Sin embargo para mejorar la adopción de esta tecnología es preciso generar mayor información de manera de lograr superar los costos e inversiones que implica, realizar un uso eficiente del agua de riego, identificar los ambientes adecuados para su utilización y la interacción con las variedades disponibles.

La utilización de diferentes grupos de madurez ha incorporado variabilidad con respecto al manejo, ya que los mismos responden distinto frente a una misma condición ambiental (Satorre et al., 2006). Dado que existe la posibilidad de compensar la disponibilidad de recursos a través de un ajuste correcto en la densidad de plantas, la elección de la misma se convierte en una decisión importante a la hora de planificar el cultivo. Sin embargo, los mecanismos a partir del cual el cultivo permite compensar el rendimiento frente a diferentes poblaciones y las importantes diferencias que existen en la capacidad compensatoria de los diferentes grupos de madurez no han sido suficientemente estudiados en condiciones de secano o bienestar hídrico a nivel nacional.

El siguiente trabajo se realiza con el objetivo de evaluar la respuesta productiva de la variedad DM 6.2 frente a diferentes poblaciones, con una estrategia de riego que posibilite el bienestar hídrico durante todo el ciclo del cultivo.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. PRODUCCIÓN DE SOJA EN URUGUAY

En el año agrícola 2013-14 la superficie total de cultivos de verano fue estimada en 1.528.000 hectáreas, donde el cultivo de soja aportó el 86% de esta área. El rendimiento promedio nacional fue de 2393 kg ha⁻¹ con una producción de casi 3,2 millones de toneladas, siendo la mayor producción de grano de soja obtenida hasta el momento. El rendimiento promedio tuvo una disminución de 9% respecto al rendimiento promedio de la zafra 2012-13, año en el que se obtuvo el máximo histórico con 2.634 kg ha⁻¹ y se mantuvo 15% por encima del promedio nacional de los últimos 10 años (MGAP. DIEA, 2014).

Mientras que en los últimos 10 años la producción ha aumentado más de cinco veces, los rendimientos se han mantenido prácticamente estancados, lo que da como resultado que el incremento de la producción de grano en el país es consecuencia directa del aumento en la superficie de siembra.

2.2. CARACTERÍSTICAS DEL AMBIENTE DE PRODUCCIÓN

2.2.1. Temperatura del aire

Según Castaño et al. (2010) la temperatura media anual sobre Uruguay es de 17,7 °C, variando desde unos 19,8 °C en la zona noroeste (Bella Unión), hasta unos 16,6 °C en la costa Sur del país. Las isotermas tienen una tendencia incremental general desde el sur hacia el noroeste.

Las temperaturas medias más altas se presentan en los meses de enero y febrero y las más bajas en junio y julio. Los promedios nacionales de las temperaturas extremas anuales del aire se caracterizan por una temperatura máxima media de 22,6 °C y una mínima media de 12,9 °C.

En el mes más cálido (enero) el promedio de las temperaturas registradas en el país es de 24 °C para las medias, 29,6 °C para las máximas y 18,5 °C para las mínimas. Mientras que durante el mes más frío (julio) el promedio de las temperaturas registradas se sitúa en 11,6 °C para las medias, 15,8 °C para las máximas y 7,3 °C para las mínimas (Castaño et al., 2010).

2.2.2. Heliofanía

Según Castaño et al. (2010) se puede observar que la heliofanía real media sobre el país presenta una variación espacial mínima, con una tendencia creciente en dirección sureste-noroeste. Los valores medios de horas de insolación media diaria sobre el país se sitúan en 7 horas, con los menores valores situados al sureste (Rocha) y los máximos al noroeste (departamentos de Salto y Artigas); la heliofanía real presenta una disminución hacia el invierno como resultado de la variación natural de la insolación astronómica. Se observan valores promedio de 9- 9,5 hs/día en enero y 5-5,5 hs/día en julio.

El mismo autor menciona que en cuanto al comportamiento histórico se observa una baja variabilidad entre años, siendo ésta un poco más alta durante el verano y más baja durante el invierno.

2.2.3. Precipitaciones (PP)

Según Castaño et al. (2010) los valores medios de PP acumulada anual sobre el país se sitúan entre 1200 y 1600 milímetros (mm) con los menores valores situados al suroeste (Colonia) y los máximos al noreste (Rivera y Artigas). El gradiente por lo tanto es incremental de suroeste a noreste. El régimen de PP en el país tiene características marítimas en la región sureste (litoral atlántico) y este (cuenca de la Laguna Merín), con un máximo de PP en el invierno. El resto del país es una región de transición entre las lluvias de carácter marítimo ya mencionadas y las lluvias veraniegas del interior del continente (Castaño et al., 2010).

En cuanto a la distribución espacial a lo largo del año, se observa el cambio en el gradiente de las PP de oeste a este en el invierno a un gradiente casi de sur a norte para los meses de verano y otoño.

Bidegain (2012) analizando una base de datos conformada por ocho trabajos realizados en Paysandú entre las zafas 2004-05 y 2010-11, los que resultaron en una serie de 74 situaciones de producción distintas para el cultivo de soja. Concluye que la variable climática que presenta mayor variación durante el ciclo del cultivo de soja son las PP. El coeficiente de variación de las mismas acumuladas en los períodos: siembra-R3 (Fehr y Caviness, 1977), R3-R6 y R6-R7, de 66, 54 y 77%, respectivamente. Para el período R3-R6 los máximos obtenidos fueron de 455 mm y los mínimos de 41 mm y una media de 210 mm.

Si bien es importante el dato de PP se debe de relacionar con el balance hídrico esta característica es la que afecta la disponibilidad hídrica en las plantas. El balance hídrico de suelos se compone de las ganancias por el riego y las PP y, las pérdidas de

agua a través de la evapotranspiración (ET), y al proceso de infiltración y de escurrimiento de los suelos (Pereira et al., 2010).

2.2.4. Evapotranspiración

Según Castaño et al. (2010) los valores medios de ET acumulada anual, estimada por el método de Penman-Monteith, se sitúan entre 1.000 y 1.200 mm, con los menores valores situados al sureste y los máximos al noroeste del país.

Las ET presentan un claro comportamiento estacional registrándose los valores más altos durante el verano (160-185 mm/mes), seguidos de la primavera (95-105 mm/mes), el otoño (65-80 mm/mes) y el invierno con (25-35 mm/mes). En cuanto al comportamiento histórico se destaca una baja variabilidad interanual, sin embargo, es un poco más alta durante el verano (Castaño et al., 2010).

2.3. LIMITANTES PARA LA PRODUCCIÓN DE SOJA EN EL URUGUAY

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

La soja en el país presenta variaciones relativamente altas en los rendimientos, tanto a nivel nacional, como entre las distintas regiones contrastantes: litoral sur, noreste y este (Díaz, 1984). Dichas variaciones pueden ser explicadas por la variabilidad de las PP tanto en cantidad como en distribución, lo cual contribuye a la ocurrencia de períodos de déficit hídrico más o menos prolongados constituyendo una causa fundamental que explica la variabilidad interanual en los rendimientos de los cultivos. La magnitud de estas deficiencias está además estrechamente relacionada con la capacidad de almacenaje de agua de los suelos y el volumen explorado por las raíces de los cultivos (Sawchik y Ceretta, 2005).

Molfino y Califra (2001) concluyen que casi un 30% de la superficie de nuestro territorio posee tierras con muy baja (menor a 40 mm) y baja (entre 40 y 80 mm) capacidad de agua disponible en el suelo (CAAD). Además la CAAD de la mayor parte de los suelos agrícolas del litoral oeste y de otras zonas agrícolas varía entre 80 y 160 mm. Esto representa aproximadamente 1/5 o 1/4 respectivamente del consumo de agua de cultivos de soja de primera con rendimientos potenciales (Andriani, 2002).

Esta característica de los suelos origina que la autonomía hídrica, o sea la posibilidad de abastecer el consumo de agua de los cultivos sin la necesidad de recargas, sea baja (Giménez, 2004, 2007). Sawchik y Ceretta (2005) evaluaron que las chacras sembradas después de un cultivo de invierno difícilmente alcanzaban el 50% de agua

disponible (AD), lo que haría al cultivo mucho más dependiente desde el comienzo de su ciclo a las recargas provenientes de las PP. Ernst et al. (2009) proponen además que en siembras de primera los tiempos para la recarga del perfil sean mayores, aumentando las posibilidades de obtener al momento de la siembra 100% del AD lo cual contribuye a no tener durante la fase de emergencia déficits hídricos.

Castaño et al. (2010) analizando una serie de más de 25 años desde 1980 hasta el 2006, obtuvieron que en promedio el porcentaje de agua disponible de los suelos es siempre inferior a su CAAD para el período comprendido entre el inicio de primavera e inicio del otoño. Por lo tanto, se esperaría que el cultivo de soja presente alguna forma de estrés hídrico durante su ciclo.

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

La información anterior explica en parte porque el aumento de la producción de soja ha estado relacionado al aumento del área, ya que el rendimiento no se ha modificado durante estos años, manteniéndose en el entorno de los 2200 kg ha⁻¹ como promedio de cultivos de primera y de segunda para el periodo 2003-2014.

2.4. CARACTERÍSTICAS ECOCOFISIOLÓGICAS

Las temperaturas y el fotoperíodo son los principales factores que regulan el desarrollo del cultivo, determinan la duración de cada una de las fases, así como también pueden existir diferencias en la sensibilidad de cada cultivar, modificando la duración de las distintas etapas a partir de la siembra (Kantolic et al., 2003).

El crecimiento, el desarrollo y el rendimiento de soja son consecuencia del potencial genético del cultivar y de la interacción con el ambiente de producción. Las condiciones del ambiente están determinadas por las características del suelo como profundidad, estructura, resistencia mecánica, capacidad de agua disponible (CAAD), aporte de nutrientes; así como características climáticas como temperatura, radiación solar, fotoperíodo y régimen hídrico (Andrade et al., 2000a).

2.4.1. Principales estados de desarrollo de soja

Ferh y Caviness (1977) desarrollaron la escala más usada en soja la cual se basa en la descripción de los principales estadios fenológicos externos.

En los estados vegetativos se describe la sucesiva aparición de hojas, teniendo en cuenta el número de nudos que presentan hojas totalmente desarrolladas. Mientras

que los estados reproductivos se basan en la floración, el desarrollo de vainas, el desarrollo de los granos y la maduración (Kantolic et al., 2003).

2.4.1.1. Estados vegetativos

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

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

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

2.4.1.2. Estados reproductivos

La soja florece cuando la duración del día comienza a acortarse, esto permite establecer para aquellos cultivares con respuesta fotoperiódica, que el pasaje del estado vegetativo a reproductivo ocurre a fines de diciembre. A pesar de que la temperatura ejerce una considerable influencia en la floración de la soja y también interacciona con el fotoperíodo, es éste último el factor de mayor importancia para determinar la inducción floral (Melgar et al., 2011). En los materiales de ciclo corto es la temperatura el factor más determinante en el pasaje de estado vegetativo a reproductivo, floreciendo independientemente del fotoperíodo. El comienzo de la floración (R1) queda definido con la apertura de la primera flor en el tallo principal. Esta etapa es caracterizada por la aparición y crecimiento de flores, frutos y semillas, donde prosigue paralelamente la aparición de hojas (Kantolic et al., 2003).

El crecimiento vegetativo y la producción de nudos continúa a través de los estados reproductivos en los cultivares indeterminados sobre el tallo principal y en los determinados sobre las ramas. La aparición de nuevas flores alcanza su máximo entre R2.5-R3 y culmina en R5 (Kantolic et al., 2003).

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

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

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

La madurez completa se alcanza en R8, cuando el 95% de las vainas han alcanzado el color de madurez. A partir de R6 el amarillamiento y la abscisión de hojas se incrementan hasta alcanzar el estado de R8 (Kantolic et al., 2003).

2.5. DETERMINANTES AMBIENTALES DEL RENDIMIENTO

Los procesos que regulan el desarrollo de un cultivo son complejos debido a que responden tanto a factores genéticos como ambientales, existiendo interacción entre estos, siendo la temperatura y el fotoperíodo los factores ambientales más importantes.

2.5.1. Temperatura

La temperatura está involucrada en la duración de los estados fenológicos de los cultivos, a medida que las plantas son expuestas a temperaturas más elevadas se produce una aceleración del desarrollo (Miralles et al., 2003). La tasa de desarrollo surge de la relación entre la duración de una fase fenológica y la temperatura y a partir de esta se definen las temperaturas cardinales, la temperatura base (T_b), temperatura óptima (T_o) y temperatura máxima (T_m). Para que haya desarrollo la temperatura debe ser mayor a T_b , el desarrollo aumenta linealmente hasta la T_o y declina entre la T_o y la T_m (Sadras et al., 2002).

La T_b para la fase germinación-emergencia está comprendida entre 6 y 9 °C presentando un rango óptimo de temperaturas entre 25 y 30 °C, temperaturas superiores a la óptima enlentecen el crecimiento hasta detenerlo por encima 40 °C (Kantolic et al., 2003). A lo largo del ciclo, la T_b tiende a disminuir y también se modifica el rango de temperaturas óptimas (Kantolic et al., 2003).

2.5.2. Requerimientos hídricos

Andriani (2002) propone que en Argentina las necesidades de agua de soja varían de 450 a 650 mm/ciclo. Por su parte Andrade et al. (2000a), determinaron un consumo de agua de 454 mm para soja, en la zona de Balcarce para el período comprendido entre los años 1993-1996.

Vilche y Costanzo (2011) en Santa Fe (Argentina) obtuvieron un consumo estimado de agua de 390 mm en un cultivo de primera. Además, Currié et al. (2006) informan para Argentina, necesidades de 500 a 600 mm y de 350-550 mm soja de 1° y 2° respectivamente. Salvagiotti et al. (2010) proponen para soja de primera requerimientos de 500 a 600 mm y de 400 a 500 mm de agua evapotranspirada para cultivos de segunda.

La FAO estipula los requerimientos de agua (ET_m) para la máxima producción entre 450 y 700 mm/temporada dependiendo del clima y la duración del período de crecimiento.

Barrios (2009) estimó la evapotranspiración real del cultivo (ET_r) para distintas formas de laboreo en soja. El autor determinó que la ET_r fue de 485, 425 y 380 mm para siembra directa, laboreo reducido y laboreo convencional, respectivamente.

Giménez y García (2011) analizando una serie histórica de 1984 a 2006, para dos cultivares de soja y para dos zonas contrastantes, estimaron que la ET_r promedio para el GM VI fue de 409 para Colonia y 443 mm para Salto, mientras que el GM IV presentó en promedio una ET_r de 352 y 360 mm para Colonia y Salto, respectivamente.

Desclaux y Roumet (1996) demostraron que el estrés hídrico afecta la fenología de soja, y por lo tanto los componentes del rendimiento. Este efecto no solo depende de características tales como duración y severidad, sino también del momento de ocurrencia en el ciclo de desarrollo.

El período entre R5 y R7 es el más crítico del cultivo, ya que el estrés provoca reducciones simultáneas del número de vainas, del número de granos por vainas y del peso de los granos, sin que haya probabilidad de compensación. En esa etapa se pueden producir pérdidas de rendimiento muy importantes (40% o más); lo aconsejable sería mantener un valor superior al 60% de agua útil en el suelo, durante este período (Andriani, 2002).

2.5.3. Radiación solar

La tasa de crecimiento de un cultivo (TCC) es la biomasa acumulada por unidad de tiempo) y resulta del balance entre la fotosíntesis (ganancias de CO₂) y la respiración (pérdidas de CO₂). Dado que la fracción de carbono fijada que se destina a la respiración es relativamente constante, los aumentos en la radiación interceptada por el cultivo se traducen en aumentos en la TCC. La radiación interceptada por un cultivo depende de la duración del ciclo y de la eficiencia de intercepción de la misma (Cárcova et al., 2003).

Edwards et al. (2005) encontraron que los rendimientos de grano y biomasa tenían una relación asintótica con la radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada desde la emergencia a la etapa R6.

Andrade (1995) determinó que reducciones en la radiación durante el período de llenado de granos produjeron una disminución en el rendimiento, el componente que más se afectó fue el número de granos y no tanto el peso de los mismos.

2.5.4. Fotoperíodo

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

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

El fotoperíodo a partir del cual se induce la floración, como la sensibilidad al mismo presentan una gran variación genotípica, los GM más cortos presentan requerimientos para florecer de fotoperíodos mayores y baja sensibilidad y a medida que aumenta el GM disminuye el fotoperíodo y aumenta la sensibilidad (Kantolic et al., 2003).

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

2.6. CRECIMIENTO DEL CULTIVO

2.6.1. Producción de materia seca

Para obtener una alta producción de MS es necesario disponer de principalmente dos factores; elevada radiación solar y temperaturas diurnas óptimas para el proceso fotosintético, posibilitando altas TCC y prolongadas duraciones de las etapas fenológicas (Andrade y Sadras, 2000b).

Salvagiotti (2009) propone que en ausencia de limitantes hídricas y nutricionales, es necesario además manejar la soja de modo que desarrolle un canopeo que permita maximizar la intercepción de radiación solar durante la etapa reproductiva temprana.

Shibles y Weber (1966) proponen lograr una alta producción de MS en estados vegetativos antes de ingresar en el período reproductivo, ya que el rendimiento depende directamente de la producción de biomasa la cual surge a partir de la intercepción y la eficiencia de uso de la radiación interceptada.

Andrade y Sadras (2000b) obtuvieron producciones de MS en ensayos de soja bajo riego de aproximadamente 12 MG ha⁻¹ de MS. Por su parte Valentinuz, citado por Andrade y Sadras (2000b) en condiciones bajo riego en Balcarce registro una producción de biomasa aérea total de 9,7 MG ha⁻¹ de MS para una densidad de 30 plantas/m².

Mondino y Gómez (2006) señalan que la máxima acumulación de MS vegetativa se produce después de R5.5, mientras que los valores máximos de MS reproductiva se alcanzan a R7, momento en que se obtienen también los mayores valores de MS total. Los máximos volúmenes de producción se registraron en R7 con un promedio de 10,5, 11,9 y 14,6 t ha⁻¹ para los distanciamientos de 0,70; 0,52 y 0,35 m respectivamente, para una población de 350.000 plantas ha⁻¹, en experimentos conducidos bajo riego.

2.6.2. Tasa de crecimiento

La TCC es función lineal de la radiación interceptada (Shibles y Weber, 1966); dicha unidad indica la acumulación de MS por unidad de superficie de suelo y por unidad de tiempo (Radford, 1967).

Según Shibles y Weber (1966), la TCC está estrechamente relacionada con la intercepción solar alcanzando su máximo valor cuando el canopeo es capaz de interceptar el 95% de la radiación solar incidente.

Shibles y Weber (1966), Baigorri y Croatto (2000) mencionan que los valores de TCC durante la fase lineal del crecimiento oscilan entre 8,6 y 18,6 g m⁻² d⁻¹ respectivamente.

La TCC media entre los 40 y 80 DPE es de 18,6 g m⁻² d⁻¹ (Andrade y Sadras, 2000b). Según Gerster y Bacigaluppo (2009) la TCC entre R2 y R5 determina el componente más importante del rendimiento que es el número de granos por unidad (Quijano et al. 1996, Egli 1998, Kantolic et al. 2003).

Shibles y Weber (1966) demostraron que existe una relación positiva entre el aumento de la población de plantas, el índice de área foliar, el porcentaje de intercepción de luz, la TCC y la MS total. Estos autores concluyeron que el óptimo rendimiento se debió a combinaciones de población de plantas y espacio entre hileras que lograron la intercepción de luz óptima (95%) a R5.

Según Andrade et al. (2000a) el manejo de la densidad de plantas es una de las herramientas más eficientes para lograr canopeos que intercepten el máximo de radiación incidente y produzcan altas TCC especialmente el PC en el que se determina el rendimiento.

2.6.3. Índice de cosecha

La acumulación de MS en grano depende de la disponibilidad de asimilados, haciendo variar la tasa de llenado de grano (Andrade et al., 2000a). Asimismo este autor indica que se espera algún tipo de relación general entre el IC y el uso del agua. Las sequías durante etapas reproductivas tempranas pueden aumentar el IC en soja con respecto al testigo regado (Andriani, citado por Andrade et al., 2000a).

Andriani, citado por Andrade y Sadras (2000b), determinó un aumento en el IC, como resultado del déficit hídrico y lo atribuye a una reducción del crecimiento vegetativo sin afectar el rendimiento significativamente. Baigorri (2004) propone un índice de cosecha entre el 40-50% para ciclos largos sembrados en fechas óptimas.

2.7. DENSIDAD DE SIEMBRA

Según Andrade et al. (2000a) la densidad óptima (número mínimo de plantas que producen máximo rendimiento) depende de las condiciones ambientales, del manejo y de las particularidades fisiológicas de la especie o del genotipo.

La densidad necesaria para maximizar el rendimiento es la que garantiza i) coberturas adecuadas para interceptar el máximo de radiación incidente durante los PC en que se determina el rendimiento, y ii) máxima partición de MS a destinos reproductivos. Por lo tanto, la densidad óptima puede ser mayor que aquella que

garantice la intercepción total de radiación en los PC mencionados (Andrade et al., 2000a). Baigorri (2004) denomina densidad de plantas óptima a aquella que: permite un buen crecimiento evitando el vuelco (plantas con tallos no muy finos y un sistema radicular bien desarrollado); reduce la incidencia de enfermedades y asegura una adecuada altura de inserción de las vainas inferiores para facilitar la cosecha y evitar pérdidas de granos.

Esto coincide con Boquet y Walker (1980) quienes afirman que la determinación de la población óptima de plantas disminuye los costos de siembra, reduce el vuelco y reduce los problemas de enfermedades.

2.7.1. Recomendaciones de densidad de siembra

Heatherly y Elmore (2004) en trabajos realizados en el norte de EEUU indican un rango entre 200.000 y 300.000 plantas ha^{-1} mientras que De Bruin y Pedersen (2008) para el estado de Iowa obtuvieron que densidades superiores a las 200.000 plantas ha^{-1} no produjeron efectos positivos en el rendimiento. De hecho los rendimientos se mantuvieron estables, incluso con grandes descensos de población. Para todas las ubicaciones y combinaciones fila-espaciamiento más del 95% del rendimiento máximo se alcanzó a poblaciones entre 118.800 y 213.800 plantas ha^{-1} dependiendo de la ubicación y la distancia entre surcos.

Norsworthy y Frederick (2002) en Carolina del Sur (EEUU) informaron que una reducción del 40% de la densidad de siembra no causó una reducción significativa de la producción en comparación con la tasa de siembra recomendada de 620.000 semillas ha^{-1} permitiendo realizar el cultivo en forma más económica.

Por su parte para el norte de EEUU, Kratochvil et al. (2004) a partir de trabajos realizados en Maryland, concluyeron que el rendimiento de soja no fue diferente entre las densidades de siembra estándar (432.300 y 555.800 semillas ha^{-1} en temporada corta y sistemas de producción de doble cultivo, respectivamente) y densidades de siembra que eran 20% menores. Rich y Renner (2007) en Michigan (EEUU) encontraron que un aumento del 40% en la tasa de siembra en comparación con la tasa estándar de 309 mil semillas/ ha^{-1} no mejoró el rendimiento de grano.

Herbek y Bitzer (1988), Christmas (1993), Beuerlein y Dorrance (2005) a partir de trabajos realizados en la mitad sur de EEUU proponen densidades de siembra de 343.000 a 516.000 semillas/ ha para anchos de fila de 38 cm. Ball et al. (2000) obtuvieron los rendimientos más altos con poblaciones de 210.000 plantas ha^{-1} en 1997 y 540.000 plantas ha^{-1} en 1998.

Cox y Cherney (2011) para el noreste de EEUU proponen densidades de siembra de 321.000 a 420.000 semillas por hectárea variando en función del sistema de

labranza. Lee et al. (2008) para la mitad de EEUU obtuvieron como resultados que el rendimiento aumentó rápidamente a medida que la población aumentó y alcanzó niveles máximos en poblaciones relativamente bajas. Cuando hubo una relación significativa entre el rendimiento y la población de plantas, la población de plantas óptima eran inferior a 260.000 plantas ha⁻¹.

2.7.2. Densidad de siembra y rendimiento

Según Satorre (2003), Díaz-Zorita y Duarte (2004), la densidad de plantas adecuada es un rango amplio y el aspecto de menor importancia relativa en la definición del potencial de rendimiento.

Por su parte Andrade et al. (2000a) observan que la estabilidad del rendimiento frente a cambios en la densidad de plantas depende de la capacidad de los individuos dentro del cultivo para expresar mecanismos de compensación cuando el número de plantas por m² es bajo (plasticidad vegetativa y reproductiva) y para producir granos en situaciones de limitados recursos por planta.

Pedersen y Lauer (2002), Norsworthy y Frederick (2002) reportaron un rendimiento constante en un amplio rango de densidades de siembra. Dichos estudios coinciden con los resultados obtenidos por Ablett et al. (1991).

Koger (2009) propone que se pueden obtener rendimientos óptimos en poblaciones finales muy bajas que ilustran la capacidad de recuperación de la soja y su capacidad para compensar las bajas poblaciones.

Lee et al. (2008) expresan que el rendimiento de la soja es relativamente insensible a la población de plantas en una amplia gama de densidades de siembra por lo que general producen el mismo rendimiento.

Según Walker et al. (2010) rendimientos óptimos se obtienen a menudo con poblaciones de plantas finales relativamente bajas. Estos resultados concuerdan con investigaciones anteriores sobre la densidad de siembra de soja y poblaciones de plantas (De Bruin y Pedersen 2008, Lee et al. 2008).

Andrade et al. (2000a) realizando ensayos en Balcarce mostraron que reducciones en la densidad cercanas al 75% a partir de 30 plantas/m² resultaron en disminuciones en el rendimiento de solo 24%. Cuando la densidad de plantas aumento en 100%, el rendimiento se mantuvo estable.

Duncan (1986) propuso dos postulados para explicar el efecto de patrones de siembra de soja en el rendimiento. Sostuvo que i) existe un rango de densidades de

siembra donde se dan aumentos de rendimiento sin aumento de la intercepción de insolación por el dosel de la planta, y ii) que, dentro de límites, el rendimiento aumentará con el aumento de biomasa vegetal durante la producción de semillas, en igualdad de condiciones.

Éste autor define tres fases de rendimiento de la soja en respuesta a la mayor densidad de plantas. Fase I: cubierto el rango de densidades de plantas donde no hay competencia entre plantas y el rendimiento es directamente proporcional a la densidad de plantas (por ejemplo, el rendimiento por planta es constante). Fase II: comienza a una densidad de plantas suficientemente grande como para interceptar esencialmente toda la insolación a dosel completo y termina en una densidad donde nuevos aumentos en la densidad no causan ningún aumento en el rendimiento. Fase III: incluye todas las densidades de siembra donde no hay cambio en el rendimiento con una mayor densidad. Las fases I y II son separadas por un intervalo de densidades donde hay una mayor competencia entre las plantas.

2.8. INTERCEPCIÓN DE RADIACIÓN Y DEPOSICIÓN DE MATERIA SECA

Según Andrade et al. (2000a) el manejo de la densidad de plantas es una de las herramientas más eficientes para lograr canopeos que intercepten el máximo de radiación incidente y produzcan altas TCC especialmente durante los PC de determinación del rendimiento.

Para sistemas de doble cultivo anual, las altas poblaciones son un medio fundamental para el establecimiento de suficiente área foliar para el máximo crecimiento y rendimiento.

La densidad de población es, por lo tanto, una potente herramienta de gestión por el que un productor puede influir fuertemente en la estación temprana intercepción de luz y el crecimiento del cultivo (Ball et al., 2000).

Se han estudiado parámetros dinámicos de crecimiento asociados con los cambios en la población de plantas, y se han obtenido resultados que indican que el rendimiento óptimo se podría obtener con poblaciones de plantas por debajo de los requeridos para máxima producción de MS total (Weber et al., 1966).

Según Lee et al. (2008) parte de la respuesta en rendimiento a la población de plantas se basa en el desarrollo del canopeo y la intercepción de luz. Shibles y Weber (1965), Wells (1991) mostraron claramente que la TCC y la fotosíntesis del dosel alcanzaron un máximo cuando la intercepción de luz se acercó al 100%. Por consiguiente, el rendimiento máximo de soja se ha demostrado que requiere cierre del canopeo en R1 (Kane y Grabau, 1992).

Holshouser y Whittaker (2002) proponen llegar a un IAF de 3,5 a 5 en R5 o un 95% de intercepción de luz en R5 lo cual coincide con Board y Harville (1994), Mondino y Gómez (2006). Por lo tanto hay que elegir la densidad de siembra adecuada que permita esas coberturas para no tener pérdidas de rendimiento (Lee et al., 2008).

Schou et al. (1978), Jiang y Egli (1995) aseguran que una reducción en la fotosíntesis durante estos estadios provoca una disminución de la TCC provocando siempre una reducción en el número de granos.

Lee et al. (2008) evaluando diferentes rangos de poblaciones obtuvieron como resultado que a pesar de que la producción de vainas fue significativa, no comenzó hasta 10 a 15 días después de R1.

Egli y Bruening (2006) sugieren que puede no ser necesario una cobertura completa del suelo y máxima fotosíntesis del dosel hasta después de R1. En este estudio la cobertura completa del suelo en R1 para producir un rendimiento máximo fue necesario en cuatro de las seis comparaciones en siembras tempranas de mayo. Además el rendimiento se redujo siempre si la cobertura completa del suelo no se logró en la etapa de crecimiento R5. Estos datos sugieren que se requiere generalmente coberturas completas del suelo en R1 o poco después para el rendimiento máximo a pesar de que el crecimiento vegetativo continúa hasta R5 (Egli et al., 1985). El panorama es más claro para fechas de siembra más tardías, donde para obtener máximos rendimientos siempre se requiere coberturas completas del suelo en R1. Estos hallazgos son generalmente consistentes con los de Board y Harville (1994), Board (2004) quienes encontraron que el máximo rendimiento se produjo cuando la intercepción de luz se acercó a 90% en R1 y un 95% durante llenado de grano y apoyan el concepto de que la máxima fotosíntesis se necesita durante la mayor parte del período R1 a R5 para maximizar el rendimiento (Lee et al., 2008).

Board (2001) informó que el rendimiento de la soja fue igual entre los tratamientos de baja, media y alta población debido a mayores tasas relativas de expansión de la hoja y una mayor intercepción de luz en las poblaciones más bajas. Los rendimientos similares entre las diferentes poblaciones se atribuyen a cambios en la partición de MS en las ramas debido a las diferencias en la calidad de la luz entre las diferentes poblaciones de plantas.

Wells (1993) demostró que la soja creciendo en bajas poblaciones por una menor competencia entreplantas, tenía una mayor tasa de crecimiento relativo, tasa de asimilación neta y tasa de crecimiento relativo de área foliar en comparación con soja crecida en poblaciones más altas.

2.9. MECANISMO DE COMPENSACIÓN CON LA VARIACIÓN EN LA POBLACIÓN DE PLANTAS

Según Andrade et al. (2000a) la estabilidad del rendimiento frente a cambios en la densidad de plantas depende de la capacidad de los individuos dentro del cultivo para expresar mecanismos de compensación cuando el número de plantas por m^2 es bajo (plasticidad vegetativa y reproductiva) y para producir granos en situaciones de limitados recursos por planta.

Koger (2009) afirmó que la capacidad de recuperación de la soja y su capacidad para compensar las bajas poblaciones de plantas es a través del aumento del número de ramas fructíferas y de vainas, lo que resulta en un mayor número de granos por planta (NGP).

Además Loomis y Connor (1992) afirmaron que el logro de bajas poblaciones óptimas está relacionada con la capacidad de la soja para aumentar el rendimiento por planta a medida que la población disminuye.

En soja la regulación del IAF y del área foliar por planta (AFP) ante variaciones de la densidad de plantas responde a aumentos o disminuciones significativas en la ramificaciones y por ende en el número de nudos y hojas por planta. En Balcarce, Valentinuz, citado por Andrade et al. (2000a) encontró para variedades indeterminadas que el número de ramificaciones aumento hasta seis veces y el de nudos totales por planta de hasta cuatro veces, cuando la densidad se modificó desde 55 a 7,7 plantas/ m^2 . En forma similar, en cultivares determinados Carpenter y Board (1997) encontraron incrementos de casi el 600% en la MS de ramas por planta en respuesta a la disminución de densidad de 27 a 7 plantas m^2 .

Carpenter y Board (1997) estudiaron los mecanismos de soja para producir una compensación a través de una serie de poblaciones. Estos autores utilizaron un cultivar del GM V sembrado en una fecha óptima a poblaciones bajas (70.000 plantas ha^{-1}), media (164.000 plantas ha^{-1}), media-alta (189.000 plantas ha^{-1}), y alta (234.000 plantas ha^{-1}). La población afectó significativamente el rendimiento por parcela, el número de vainas por planta, y otros componentes de la rama que determinan el rendimiento. La población óptima en este estudio fue de 164.000 plantas ha^{-1} , la población baja fue subóptima y tanto poblaciones de alta- media y alta fueron supra óptimas. El 58% de disminución a partir de una población de 164.000 plantas ha^{-1} resultó en una disminución de rendimiento de sólo 12%, mientras que un aumento del 43% no dio lugar a cambios de rendimiento significativo. Dicha estabilidad del rendimiento se explicó por los cambios en rendimiento por planta entre las poblaciones. El rendimiento por planta en la población baja fue de 63,3 g por planta, 24,5 g por planta en la media y 19,3 g por planta en la alta población.

El número similar de vainas por metro cuadrado entre poblaciones demostró que las vainas por planta deben de haber controlado el rendimiento por planta a medida que aumentaba la población de baja a alta población. El peso del grano y el número de granos por vaina no afectó el rendimiento por planta a medida que la población se modificó. Los datos indican que el número de vainas por planta disminuyó significativamente entre la población baja y media y entre la población media y alta (Carpenter y Board, 1997).

2.9.1. Componentes del rendimiento

El rendimiento en grano se construye a partir de determinados componentes de rendimiento, estos son; número de nudos/superficie, número de vainas/superficie, número de granos/vaina y peso promedio de granos. El producto del número de granos por superficie por el peso de los granos determina el rendimiento final. Estos componentes pueden modificarse por el genotipo, el ambiente y el manejo afectando al rendimiento final (Bodrero, 2003).

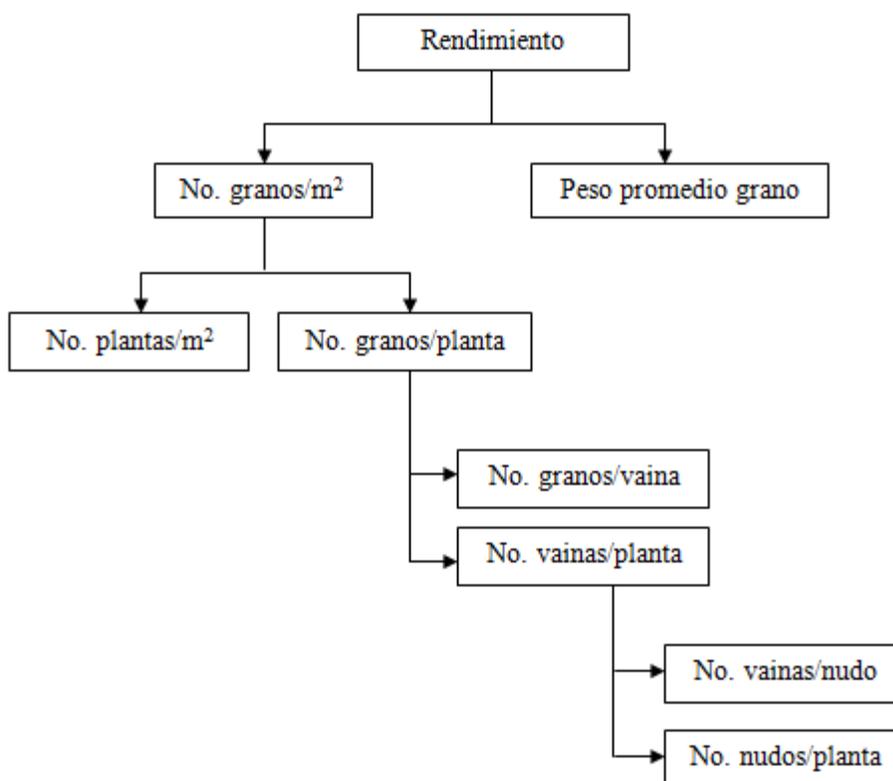


Figura 1. Componentes del rendimiento.

2.9.1.1. Número de nudos

La mayoría de los estudios han indicado que la compensación del rendimiento en soja es a partir de aumento de vainas por planta asociada con un mayor desarrollo de la ramificación (Carpenter y Board, 1997).

Según Satorre (2003) con el aumento de la densidad de plantas, el número de nudos por superficie y el número de nudos reproductivos puede aumentar. Asimismo el número de nudos por metro cuadrado presentó una reducida variación en un amplio rango de densidades, ya que el número de vainas reproductivas por nudo disminuyó al aumentar la densidad. Esta dinámica de compensación permite que el cultivo presente bajas diferencias en rendimiento frente a determinadas variaciones en densidad. Díaz-Zorita y Duarte (2004) indicaron que el número de plantas por unidad de superficie tiene un efecto neutro sobre el número de granos y sobre el rendimiento, es decir, la mayor densidad de plantas es compensada por un menor número de nudos/planta y por una disminución de la fertilidad de cada nudo.

Ferraris et al. (2003) encontraron que en tratamientos de baja densidad se incrementó significativamente el número de nudos y vainas por planta. Esto se debió a un aumento en la ramificación, donde precisamente se ubicaron la mayor cantidad de destinos reproductivos. Baigorri (2004) encontró que frente a cambios en la densidad de siembra había diferencias significativas en el número de nudos y vainas sobre el tallo principal, aunque estas fueron de menor magnitud respecto de las ramificaciones. No se observaron diferencias significativas en el número de vainas y granos/m², lo que estaría indicando una notable capacidad compensatoria del cultivo hasta densidades muy bajas.

2.9.1.2. Número vainas y granos

Satorre (2003) sostiene que una importante proporción de primordios de vaina mueren antes de la apertura floral, y muchas abortan antes de alcanzar su tamaño final, de forma tal que el número de vainas que finalmente se establecen en cada nudo, depende de cuantas inflorescencias prosperaron en él y cuantas vainas se establecieron en cada inflorescencia. Es normal que el aborto de estructuras que podrían dar semillas supere el 40-60% de las flores generadas. Las más proclives al aborto son generalmente las inflorescencias secundarias y las flores ubicadas en las posiciones distales de los racimos.

Según Lehman y Lambert, Tetio-Kagho y Gardner, Thompson y Fenton, citados por Andrade et al. (2000a) el número de granos por unidad de superficie es el componente del rendimiento más afectado por la densidad de plantas. En Balcarce,

disminuciones de la densidad a un cuarto de la óptima incrementaron el NGP un 190% en soja (Andrade et al., 2000a).

El NGP y vainas por planta suele reducirse aumentando la población de plantas, pero esta reducción es más que compensado por el mayor número de plantas por metro cuadrado hasta una población óptima de plantas (Boquet, 1990).

Según Andrade et al. (2000a) el número final de granos que puede establecerse en relación al número potencial se asocia principalmente con la capacidad de crecimiento de los individuos dentro del cultivo durante los PC de fijación de vainas y semillas en soja. Dicha capacidad de crecimiento es determinante de la disponibilidad de asimilados para las estructuras reproductivas en formación.

En relación al número de granos potenciales por planta se modifica a través del número de ramificaciones, nudos reproductivos potenciales por rama y vainas potenciales por nudo reproductivo (Jiang y Egli, Board y Tan, citados por Andrade et al., 2000a). Este mismo autor bajo óptimas condiciones de crecimiento observó que el número de granos potenciales por planta puede aumentar hasta 230% al variar la densidad entre 56 y 8 plantas m^2 .

Valentinuz et al., Egli y Brander, citados por Andrade et al. (2000a) confirmaron que tanto la cantidad de flores diferenciadas como el número de semillas por planta son proporcionales a la disponibilidad de recursos por planta durante un amplio período reproductivo. El aumento en la densidad entre 7,5 y 55 plantas/ m^2 produjo una disminución de 260 a 50 semillas por planta y un marcado aumento de aborto de flores y vainas que puede llegar a un 80%. El número de semillas por individuo se determina principalmente durante la fijación de vainas (R3 a R6) y es función de la tasa de crecimiento de planta (TCP) durante esta etapa. Por lo tanto, este componente del rendimiento se afecta en respuesta a tratamientos que modifican el crecimiento de la planta hasta R6.

El número de granos por individuo está asociado directa y linealmente con la TCP. El crecimiento de esta especie presenta una gran respuesta al aumento en la disponibilidad de espacio y recursos. El hecho de que las plantas de soja no manifiesten un "plateau" en la producción de granos a altas TCP sugiere, entonces, que existe equilibrio entre la plasticidad vegetativa y reproductiva. En bajas densidades, aumenta significativamente el número de granos potenciales y disminuye el aborto de flores (Valentinuz, citado por Andrade et al., 2000a).

El bajo umbral mínimo de crecimiento por planta para producir granos en soja (cerca a 0,1 g/día) contribuye a explicar la estabilidad del rendimiento y los muy bajos

niveles de esterilidad en respuesta a importantes incrementos en la densidad de plantas (Vega, citado por Andrade et al., 2000a).

2.9.1.3. Peso de grano

Según Díaz-Zorita y Duarte (2003) el peso de grano se describe como una fusión de la TCC y de la duración del período de llenado. Ambos están gobernados genéticamente, dependen de la variedad, pero varían ampliamente de acuerdo a las condiciones ambientales.

Andrade y Ferreiro, citados por Andrade et al. (2000a), apuntan que cambios en la provisión de asimilados durante el período de crecimiento de la semilla afectan la TCC y pueden afectar también la duración del período de llenado lo cual afectaría el peso del grano.

Por otro lado, Major et al., citados por Andrade et al. (2000a) afirmaron que la duración del llenado de grano en la soja depende del fotoperíodo mientras Egli y Wardlaw, citados por Andrade et al. (2000a) afirman que la tasa de llenado es función de la temperatura.

Ferraris et al. (2003) encontraron que cambios en la densidad no afectaron el peso de los granos. Además Jiménez (1995) con respecto a la variable peso de granos no encontró diferencias en el tamaño del grano al variar la densidad.

En ensayos realizados por De Bruin y Pedersen (2008) determinaron que el peso de grano no se modificó en dos de los tres lugares evaluados mientras que en el restante el peso de 100 granos se redujo en 0,5 g con una separación entre hileras de 38 cm de en comparación con 76 cm. Esto coincide con otros estudios (Ethredge et al. 1989, Egli 1994, Elmore 1998). El peso de grano aumentó 4% cuando las poblaciones de plantas finales aumentaron de 166.900 a 402.700 plantas ha^{-1} . Esta respuesta del peso de semillas para densidad de siembra se ha documentado en otro estudio utilizando el mismo cultivar de soja, que también documentó el aumento de semillas a tasas de siembra mayores que 111.000 semillas ha^{-1} (Elmore, 1991). Los resultados obtenidos difieren de otros informes (Ethredge et al. 1989, Egli 1994, Elmore 1998) quienes afirman que el peso de semillas disminuye a medida que la densidad de siembra aumentó.

2.10. DENSIDAD DE SIEMBRA Y ALTURA DE PLANTA

Un aumento de la altura de la planta con el aumento de la densidad de siembra debido a la competencia interplanta fue informado por Goos y Johnson (2001). Del mismo modo Devlin et al. (1995) reportaron que la altura de la planta no respondió al aumento de la densidad de siembra en condiciones limitadas de humedad del suelo a la siembra.

En ensayos realizados por De Bruin y Pedersen (2008) dieron como resultado que poblaciones finales de 316.000 y 402.700 plantas ha^{-1} incrementaron la altura de la planta 2 y 6 cm, respectivamente, en comparación con poblaciones de 166.900 y 258.600 plantas ha^{-1} . Por su parte Elmore (1991) documentó que el incremento de altura de la planta se asoció con la población de plantas, solo cuando las mediciones finales eran mayores a 346.000 plantas ha^{-1} .

No obstante aunque la altura de la planta generalmente no se considera un factor importante para determinar el rendimiento de grano, se ve afectada por las condiciones ambientales (Alessi y Power 1982, Goos y Johnson 2001).

Devlin et al. (1995) observaron que tanto la altura de la planta y el rendimiento de grano aumentó con la densidad de siembra sólo bajo condiciones ambientales de alto rendimiento. Por lo tanto, una respuesta positiva de la altura de la planta a densidad de siembra puede indicar una condición ambiental de menos estrés.

2.11. DENSIDAD DE SIEMBRA Y FACTORES DEL AMBIENTE Y MANEJO

2.11.1. Densidad óptima y disponibilidad de agua y nutrientes

Las condiciones ambientales tales como suelo, clima y malezas pueden limitar el crecimiento y desarrollo al cultivo por lo cual es necesario aumentar la densidad de siembra para lograr una adecuada cobertura. En el caso de tener cultivares con mayor crecimiento ya sea por una mayor longitud de ciclo que pueda tener tendencia al vuelco es necesario usar densidades menores.

En el caso de una adecuada disponibilidad hídrica el rendimiento de soja es poco sensible a la variación con la densidad debido a la gran plasticidad que muestran las plantas (Carpenter y Board, 1997).

Sin embargo, en ambientes poco productivos durante la primera mitad ciclo del cultivo, la plasticidad vegetativa no se expresa adecuadamente, por lo que la densidad óptima puede ser mayor que la utilizada en ambientes más favorables (Wells, 1991).

Bajo condiciones de sequía en Virginia, se requirió casi un triple aumento en las poblaciones de plantas para el máximo rendimiento en comparación a cuando la humedad adecuada estaba presente (Holshouser y Whittaker, 2002)

Sin embargo Alessi y Power (1982), Elmore (1998) proponen que en condiciones de sequía el rendimiento no puede aumentar con altas densidades de siembra, debido a la competencia por la limitada humedad del suelo.

En ensayos realizados por Chen y Wiatrak (2011), obtuvieron una respuesta positiva del rendimiento a la densidad de siembra en un solo año, cuando pudo haber ocurrido menos estrés por sequía. Esto está de acuerdo con los informes de que la sequía durante la temporada de crecimiento, especialmente durante la etapa de llenado de grano, puede tener un gran efecto en el rendimiento, y que el rendimiento de grano no puede responder a la creciente densidad de siembra en condiciones de secano. Esto refleja la importancia de la distribución oportuna de las PP en el rendimiento de grano. La reducción en el rendimiento de grano con tales altas tasas de siembra podría haber sido debido a las limitaciones distintas de la humedad del suelo.

Una menor densidad de plantas en condiciones de baja disponibilidad hídrica produce un uso conservativo del agua durante el período vegetativo al reducir la cobertura vegetal y dirigir una mayor proporción de la radiación hacia la superficie seca del suelo, más resistente a la pérdida de agua que el cultivo. Esto puede incrementar la disponibilidad de agua en las etapas reproductivas. Sin embargo esto puede ser de utilidad sólo en aquellos sistemas de producción que están sometidos a sequías progresivas y severas que dependen en gran medida del agua de reserva del suelo (Alessi y Power, 1982).

Baigorri, citado por Andrade et al. (2000a) recomienda aumentos en la densidad entre un 25 y 28% para ambientes de baja calidad, por su parte Heatherly y Elmore (2004) sugieren aumentos del 50% para ese tipo de ambientes.

Baigorri (1997) propone una densidad óptima en siembras tempranas de 30 plantas /m², sugiere que, en cultivares de ciclo corto (GM III) sembrados tardíamente, la densidad sea incrementada en 35-50% en ambientes de buena aptitud y en 65-70%, conjuntamente con el uso de distanciamientos entre surcos de 35 a 52 cm en ambientes de baja calidad.

2.11.2. Densidad óptima y fecha de siembra

Salvagiotti et al. (2010) proponen que en soja retrasos en la fecha de siembra aceleran más el desarrollo que el crecimiento vegetativo por lo que disminuyen la biomasa y posiblemente la cobertura de cultivo al inicio del PC para la determinación del rendimiento.

En soja retrasos en la fecha de siembra aceleran más el desarrollo que el crecimiento vegetativo por lo que disminuyen la biomasa y posiblemente la cobertura de cultivo al inicio del PC para la determinación del rendimiento (Salvagiotti et al., 2010).

Baigorri y Croatto (2000), Díaz-Zorita y Duarte (2004) afirman que en siembras tardías es conveniente aumentar las densidades de siembras, lo mismo en siembras de septiembre y octubre en las que se reduce la altura. Lee et al. (2008) concluyeron que poblaciones óptimas de plantas fueron siempre muy inferiores a las recomendaciones actuales. Las fechas de siembra tardías y los cultivares de maduración temprana requieren poblaciones más altas que fechas de siembras tempranas y cultivares de maduración tardía.

Baigorri y Croatto (2000), Díaz-Zorita y Duarte (2004) enuncian que a mayor latitud las densidades óptimas tienden a ser mayores complementando la con la reducción en espaciamientos entre surcos para lograr rápidas coberturas e incrementar así la eficiencia de uso de la radiación solar en siembras de fines de diciembre principios de enero.

El uso de densidades altas en soja especialmente en cultivares de ciclo corto permite disminuir los efectos depresores de las fechas de siembra tardías sobre el IAF y la cobertura del cultivo (Boquet, 1990). Es esperable asimismo encontrar una mayor respuesta al aumento de la densidad en siembras tardías en ambientes poco productivos donde el cierre del canopeo antes de los estadios reproductivos está más comprometido.

Según Salvagiotti et al. (2010) el uso de altas densidades y espaciamientos angostos en épocas de siembra tempranas de octubre producen un rápido desarrollo del área foliar. Esto podría ser contraproducente en áreas en donde la disponibilidad de agua es limitante o en sistemas de alta producción, ya que se favorece el vuelco de las plantas (tallos más débiles).

Las fechas de siembra muy tempranas o fechas de siembra muy tardías, con cultivares de GM relativamente cortos y los peores ambientes productivos, son las situaciones donde se debe buscar densidades de plantas mayores (límite superior del rango de densidades de siembra). Las siembras tardías de soja requieren densidades de

población considerablemente mayores que aquellas recomendadas para la producción que maximice el rendimiento (Ball et al., 2000).

2.11.3. Densidad óptima y elección de cultivar

Baigorri y Croatto (2000), Díaz-Zorita y Duarte (2004) han reportado respuestas crecientes del rendimiento a la densidad de siembra en cultivares de ciclo corto y en siembras tardías. Estos autores recomiendan mayores densidades de siembra a menor longitud de ciclo y para un mismo cultivar a medida que se modifica la fecha de siembra con respecto al mes de noviembre.

En estudios realizados por Lee et al. (2008) determinaron que cultivares de maduración temprana requieren poblaciones mayores que cultivares de maduración tardía. Las densidades de siembra más altas en cultivares de maduración temprana han sido reportados en otros entornos. Holshouser y Jones (2003), Edwards et al. (2005) determinaron que en Virginia, un cultivar de GM III requiere el doble de la población de plantas ($741,000 \text{ plantas ha}^{-1}$) que un cultivar GM V ($370.500 \text{ plantas ha}^{-1}$) para alcanzar el máximo rendimiento.

Las densidades más altas de siembra son necesarias porque los cultivares tempranos alcanzan primero la etapa R1 que los cultivares tardíos (Kane y Grabau 1992, Egli y Bruening 2000) esto resulta en plantas más pequeñas y de menor desarrollo del dosel en la etapa R1. Esto lleva a la necesidad de un mayor número de plantas para maximizar la intercepción de la luz (Kane y Grabau, 1992).

Egli (1988) realizó un experimento con una variedad indeterminada y una variedad determinada; las densidades de población utilizados en los análisis variaron de 0,6 a 24 plantas/m². El rendimiento del cultivar indeterminado aumentó a medida que aumentó la densidad de plantas por encima de la densidad requerida para 95% de intercepción de radiación en R5. El incremento en la producción fue el resultado de los aumentos en el número y peso de grano. Sin embargo, el cultivar determinado obtuvo el máximo rendimiento en la densidad de siembra que proporcionó 95% de intercepción de radiación en la etapa de crecimiento R5. Los datos para el cultivar indeterminado confirman un análisis teórico y recientemente publicado de la respuesta de rendimiento de soja a la densidad de plantas. Los datos sugieren que densidades de planta superiores a los requeridos para maximizar intercepción de insolación en R5 puede ser necesarias para el máximo rendimiento de cultivares indeterminados.

Edwards et al. (2005) en un ensayo en el que se evaluaron las respuestas de distintos GM (00 a VI) a cinco diferentes poblaciones en condiciones sin deficiencias hídricas durante tres años, obtuvieron que la población de plantas requerida para lograr el máximo rendimiento disminuyó a medida que el GM se alargó. Los valores del IC en general aumentaron ligeramente con el aumento de la población de plantas en GM 00 y

0, y disminuyeron ligeramente con el aumento de las poblaciones de plantas en GM V y VI, no teniendo respuesta al aumento de las poblaciones de plantas en GM I a IV. La investigación demostró que un amplio rango de GMs de soja pueden producir rendimientos similares, pero las densidades de siembra óptimas y las necesidades de riego varían según la madurez.

Según Wiatrak et al. (2009) independientemente del GM de la soja la recomendación actual de densidad de siembra es de 272.000 semillas ha^{-1} para fila ancha (≥ 76 cm) en Carolina del Sur. Sin embargo, la reducción de la densidad de siembra para GM IV, VII y VIII pueden reducir el crecimiento vegetativo y el rendimiento debido a un período de crecimiento corto (Ball et al. 2000, Chen y Wiatrak 2011). Por el contrario, los cultivos de soja de GM V y VI pueden ser capaces de mantener el rendimiento en densidades de siembra más bajas debido a que el largo del período de crecimiento permite un mayor desarrollo vegetativo para alcanzar un deseado IAF (Popp et al., 2006).

2.11.4. Interacción entre población y distancia entre hilera

La distribución espacial de las plantas en una comunidad de cultivos es un factor determinante del rendimiento, y muchos experimentos se han realizado para determinar el espaciamiento entre hileras y entre plantas dentro de la fila que maximiza el rendimiento.

Dos conceptos generales se utilizan con frecuencia para explicar la relación entre la distancia entre surcos, la densidad de plantas, y el rendimiento. En primer lugar, el rendimiento máximo sólo puede obtenerse si la comunidad de plantas produce suficiente área foliar para proporcionar la máxima interceptación de insolación durante la etapa reproductiva de crecimiento (Egli, 1988). En segundo lugar, distancias equidistantes entre plantas maximizan rendimiento, ya que minimiza la competencia entre plantas (Egli, 1988).

Walker et al. (2010) concluyeron que aunque la respuesta del rendimiento a la distancia entre surcos estrechos parecía estar relacionada con la variedad y el medio ambiente, las hileras estrechas siempre proporcionan rendimientos que eran al menos iguales y en algunos casos superiores a los de las hileras anchas.

En cultivares del GM III en la mitad sur de la parte superior de los EEUU, los cultivares se deben plantar con una distancia entre surcos estrecha, para aprovechar el potencial del cultivar y sus interacciones entre el medio ambiente y maximizar los rendimientos (Bowers et al. 2000, Heatherly y Elmore 2004).

En un ensayo realizado por De Bruin y Pedersen (2008) evaluando distancia entre hileras anchas (76 cm) y estrechas (38 cm) y cuatro densidades de siembra (185.000; 309.000; 432.000, y 556.000 semillas ha^{-1}) en tres localidades durante tres años la soja sembrada con una distancia entre hileras de 38 cm produjo 248 kg ha^{-1} más que la soja sembrada a 76 cm.

La ventaja de una distancia entre surcos estrecha es que provoca una distancia entre plantas más equidistante conduce a un mayor desarrollo del área foliar del dosel y una mayor intercepción de la luz a principios de temporada (Shibles y Weber, Weber et al., citados por De Bruin y Pedersen, 2008). Estos cambios en la tasa de formación del canopeo provocan un aumento en el crecimiento de los cultivos, mayor acumulación de MS y rendimiento (Bullock et al. 1998, Andrade et al. 2002).

Sin embargo, estreses abióticos y bióticos pueden mitigar la respuesta del rendimiento de la soja para estrechar el espaciamiento de filas. El estrés hídrico ha sido documentado por reducir el beneficio en el rendimiento de la distancia entre surcos estrechos en Iowa (Taylor, 1980), Dakota del Norte (Alessi y Power, 1982), Kansas (Devlin et al., 1995), Nebraska (Elmore, 1998) y en Texas (Heitholt et al., 2005). El estrés de nitrógeno (Cooper y Jeffers, 1984) y el aumento de la densidad de siembra en seco, en ambientes de bajos potenciales de rendimiento redujo el rendimiento en surcos estrechos (Devlin et al. 1995, Elmore 1998).

El aumento de la densidad de siembra podría ser utilizado en un sistema hileras estrechas para maximizar la utilización del espacio. En trabajos anteriores se indica que la densidad de siembra óptima aumentó en un sistema de separación de hileras estrechas (Devlin et al., 1995).

Una preocupación, sin embargo, es que a medida que aumenta la densidad de siembra se incrementa la competencia de las plantas, generando presión sobre el dosel, minimizando el beneficio de distancia entre surcos estrechos, especialmente cuando las condiciones ambientales limitan el crecimiento de la planta (Devlin et al. 1995, Elmore 1998). Las densidades de siembra utilizadas en Iowa difieren en función de la distancia entre surcos. Las densidades de siembra comunes que se utilizan para garantizar la suficiente población a la cosecha son 494.200; 444.800; y 370.000 semillas ha^{-1} para 19, 38, y 76 cm de distancia entre hileras, respectivamente (De Bruin y Pedersen, 2008).

De Bruin y Pedersen (2008) concluyeron que la adopción de distancias entre hileras estrechas y densidades de siembra menores que las recomendaciones actuales podrían ser utilizadas para reducir los costos de producción y aumento del rendimiento y la rentabilidad.

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 2013-14. 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.

Cuadro 1. Principales 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 AD.

3.1.1. Manejo del experimento

El ensayo se sembró el 21 de noviembre con una sembradora experimental (Wintersteiger PLOTMAN, Gesellschaft m.b.n. &CO, Austria), se utilizó una distancia entre surcos de 0,40 m. La variedad de soja utilizada fue el DM 6.2i, con hábito de crecimiento indeterminado. En el estado V2 (Fehr y Caviness, 1977) se realizó un ajuste manual de plantas con el objetivo de lograr las poblaciones requeridas según los distintos tratamientos. El cultivo se mantuvo libre de malezas, enfermedades y plagas durante todo el ciclo.

Cuadro 2. Calendario de eventos fenológicos

Fecha	Estado Fenológico	Días post emergencia
21/11/2013	Siembra	
02/12/2013	Emergencia	
03/01/2014	R2	32
12/02/2014	R4	72
12/03/2014	R6	100
20/04/2014	R8	140

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

3.1.2. Tratamientos planificados

T1: 200.000 plantas ha⁻¹ con bienestar hídrico.

T2: 300.000 plantas ha⁻¹ con bienestar hídrico.

T3: 400.000 plantas ha⁻¹ con bienestar hídrico.

T4: 500.000 plantas ha⁻¹ con bienestar hídrico.

T5: 300.000 plantas ha⁻¹ en condiciones de secano.

Tratamientos logrados

T1: 200.000 plantas ha⁻¹ con bienestar hídrico.

T2: 295.000 plantas ha⁻¹ con bienestar hídrico.

T3: 385.000 plantas ha⁻¹ con bienestar hídrico.

T4: 475.000 plantas ha⁻¹ con bienestar hídrico.

T5: 300.000 plantas ha⁻¹ en condiciones de secano.

En el presente trabajo se entiende por bienestar hídrico al contenido hídrico del suelo con porcentajes de AD mayores a 40% durante los periodos no críticos de determinación del rendimiento (PNC) y mayores a 60% de AD en el PC.

Los tratamientos se distribuyeron en 15 unidades experimentales. Cada unidad experimental (parcela) estuvo constituida por 5 hileras de cultivo de 5 m de longitud, sembradas a una distancia entre hileras de 0,4 m.

El sistema de riego utilizado fue de goteo conformado por cintas con goteros cada 0,2 m y con un caudal por gotero 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 acuerdo a la siguiente fórmula:

$$BH = R + PP - ETc$$

Siendo R= mm agregados de agua de riego, PP= mm de lluvia y ETc= mm de evapotranspiración de cultivo, calculada por el método propuesto por (Allen et al., 1998) donde ETc= ETo x Kc. La ETo es la evapotranspiración del cultivo de referencia y Kc es el coeficiente del cultivo en las diferentes etapas de desarrollo. La ETo fue calculada utilizando la ecuación de FAO Penman-Monteith y los Kc utilizados fueron los recomendados por FAO.

3.2 DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO

3.2.1. Hipótesis biológicas

En la variedad de soja DM 6.2i bajo condiciones de bienestar hídrico no se diferencian los rendimientos al variar la población en un rango de 200.000 -500.000 plantas ha⁻¹.

3.2.2. Hipótesis estadísticas

Ho: Las medias de los tratamientos son iguales: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$ o los efectos de los tratamientos son iguales: $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5$

Ha: Existe al menos una diferencia entre las medias de los tratamientos o existe al menos un efecto de los tratamientos diferente.

3.2.3. Diseño experimental

El diseño utilizado fue un DBCA (Diseño en bloques completos al azar), con tres bloques y cinco tratamientos.

$$\text{Modelo: } Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Y_{ij} : rendimiento en kg ha⁻¹.

μ : media poblacional del rendimiento.

α_i : efecto de la i -ésimo tratamiento.

β_j : efecto del j -ésimo bloque.

ε_{ij} : error experimental asociado al i -ésimo tratamiento en el j -ésimo bloque.

Siendo: i : 1, 2, 3, 4, 5

j : 1, 2, 3

Supuestos:

- Al modelo:

- Es correcto (en relación al material experimental)
- Es aditivo
- No existe interacción bloque por tratamiento

-A los errores experimentales:

- Son variables aleatorias
- $\varepsilon_{ij} \sim N$
- $E(\varepsilon_{ij}) = 0$ para todo i, j
- $V(\varepsilon_{ij}) = \sigma^2$ para todo i, j
- Son independientes

Por definición $\alpha_i = \mu_i - \mu$

Criterios de decisión:

-Si las diferencias entre las medias muestrales son “suficientemente” grandes se rechaza H_0 . Si la variación entre medias de tratamientos (CM tratamientos) es “suficientemente” grande se rechaza H_0 . Si el p-valor es $= 0 < \alpha = 0,05$ se Rechaza H_0 .

-Si la variación dentro de los tratamientos (CM error) es “suficientemente” grande no se rechaza H_0 . Si el p-valor es mayor a $\alpha = 0,05$ No se Rechaza H_0 .

3.3. DETERMINACIONES REALIZADAS

3.3.1. Determinaciones durante el ciclo del cultivo

En el desarrollo del cultivo se realizaron dos muestreos de MS en la etapa reproductiva, siendo estos correspondientes a los estadios R4 y R6, para ello se cortó a ras del suelo 1 m lineal de plantas por parcela, las muestras fueron colocadas en estufa a una temperatura de 60 °C hasta lograr un peso constante. Los muestreos tuvieron como objetivo evaluar la evolución de la acumulación de biomasa aérea, y además fueron utilizados para determinar la TCC entre R4-R6.

También se realizaron dos mediciones de altura de planta en la etapa reproductiva, durante los estadios R4 y R6. Para ello se midieron 10 plantas representativas de cada tratamiento desde la base del tallo hasta el último nudo fructífero.

3.3.2. Determinaciones a cosecha

Para desarrollar la estimación de los componentes del rendimiento se cosechó manualmente 1 m lineal de plantas en la hilera central de cada parcela para evitar el efecto “borde”. Al tallo principal se le midió altura de planta, número de nudos fértiles, número de vainas, número de granos y número de ramas, y a estas últimas se les realizaron las mismas mediciones que al tallo principal.

El rendimiento en grano se estimó en cada parcela cosechando 8 m lineales, en los que se midió peso total de grano, peso de mil granos y porcentaje de humedad.

3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados fueron analizados con el software estadístico “INFOSTAT” versión estudiantil 2013. Con este se realizaron:

Análisis de la varianza

Mediante el análisis de la varianza se descompone la variación total en tantos componentes como tenga el modelo.

Pruebas de Comparación Múltiple

Se realizó una prueba de comparación múltiple (Tukey), al 5% de significancia.

Análisis de correlación

Se analizaron las variables de interés, de forma de obtener una medida de la magnitud de asociación entre las variables, mediante el coeficiente de Pe.

3.5. CONDICIONES CLIMÁTICAS EN EL PERÍODO DEL CULTIVO

3.5.1. Precipitaciones

En la Figura 1, se pueden observar las PP mensuales registradas en el campo experimental de riego de la EEMAC durante el ciclo del cultivo y los valores promedio para la ciudad de Paysandú, obtenidos en la serie histórica comprendida entre los años 1961 y 2009 (elaborado en base a datos suministrados por MDN. DNM, 2014). Se puede ver que las PP de primavera-verano 2013-14 se caracterizaron por ser muy superiores a la media en los meses de enero y febrero, 165 y 194 mm respectivamente, mientras que las PP de diciembre y marzo fueron inferiores a la media histórica.

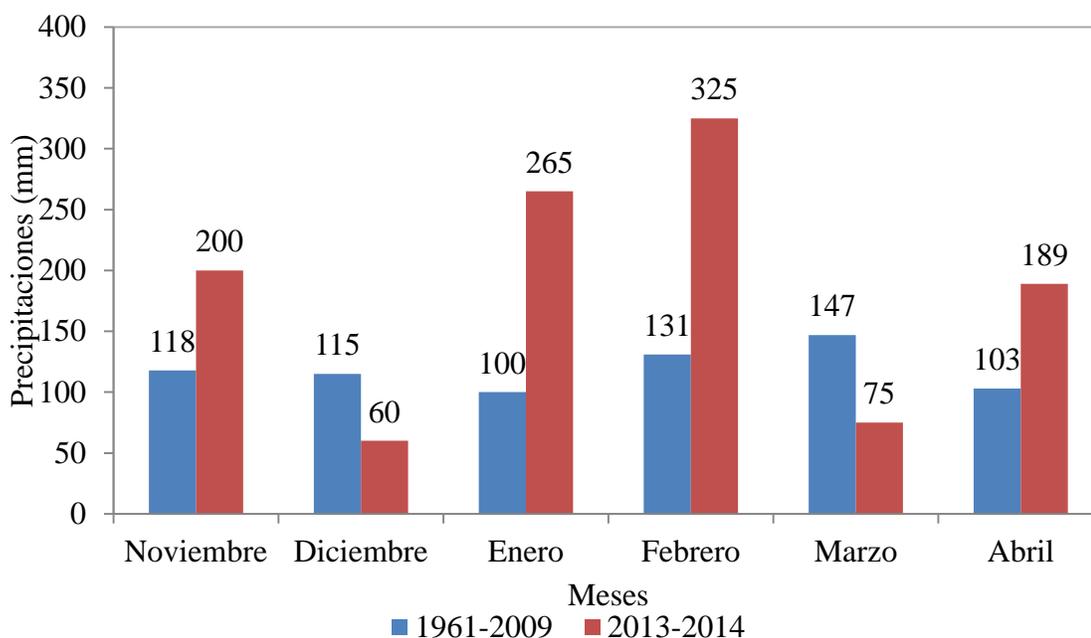


Figura 1. Precipitaciones ocurridas durante 2013-2014 obtenida en el campo experimental de riego de la EEMAC, Facultad de Agronomía y valores promedio de la serie histórica 1961 a 2009 (elaborado en base a datos suministrados por MDN. DNM, 2014).

Cabe destacar que las mayores PP ocurridas en el ciclo del cultivo se dieron en el mes de febrero, en el cual se ubicó la mayor parte del PC de determinación de rendimiento del cultivo (R4 a R6 de la escala de Fehr y Caviness, 1977). La etapa vegetativa coincidió con las condiciones de déficit hídrico del mes de diciembre. Esto puede haber afectado el crecimiento y la acumulación de MS durante este período. En cuanto al período de floración que se dio en el mes de enero, existió un período de

aproximadamente 10 días en los cuales no se dieron PP por lo que se presentaron condiciones de déficit hídrico durante el mismo.

Las PP totales durante la fase del cultivo fueron de 775 mm siendo más de 150% superiores con respecto a la media histórica.

3.5.2. Radiación solar incidente

En la Figura 2 se puede observar la RS incidente durante el período 2002-12 y la RS registrada durante la etapa de crecimiento del cultivo. En la misma se destacaron las menores radiaciones de los meses de enero y febrero con respecto a la década 2002-12, como consecuencia de las mayores PP ocurridas en estos meses y por ende una mayor proporción de días nublados.

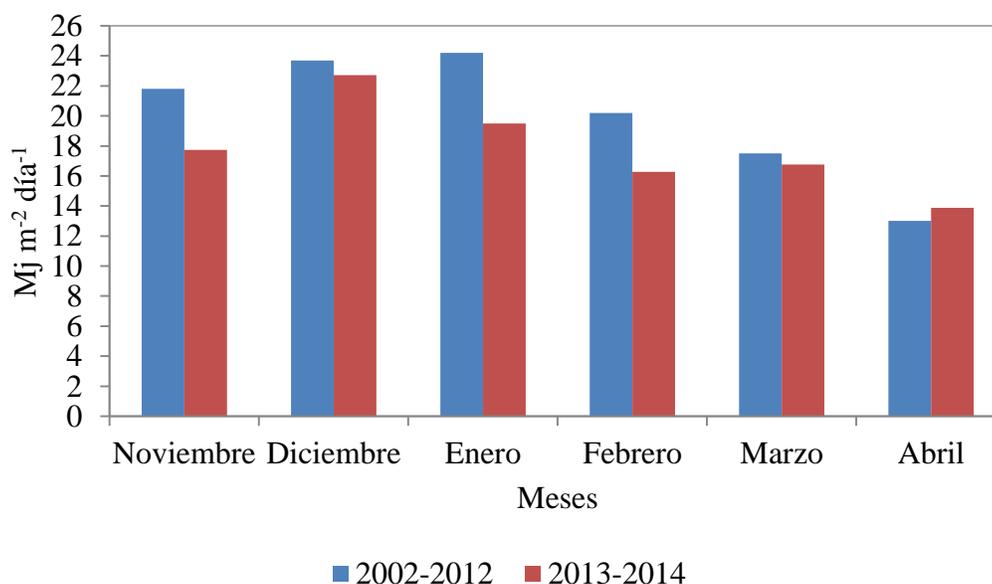


Figura 2. Radiación solar ($\text{Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) ocurrida durante el año agrícola 2013-14 y valores promedio de la serie histórica 2002-12, obtenidas de la estación meteorológica automática de la EEMAC, Facultad de Agronomía.

A nivel de cultivo, la disminución del 20% de la RS ocurrida en febrero con respecto a la serie histórica, coincidió con la fase temporal del cultivo del PC de determinación del rendimiento. Asimismo es importante destacar que durante la fase de floración del cultivo (R1-R3) existió también una disminución del 20% de la RS con respecto a la serie histórica considerada.

Estos acontecimientos pudieron traer como consecuencia una menor acumulación de MS y una menor TCC, y por lo tanto la imposibilidad de concretar los potenciales de rendimiento (Andrade y Sadras 2000b, Giménez 2014). Además son varios los autores que coinciden en que es determinante en el rendimiento la cantidad de radiación incidente así como la que es capaz de ser interceptada por el canopeo (Baigorri y Croatto 2000, Andrade y Sadras 2000b, Mondino 2006, Otegui 2009, Salvagiotti 2009).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS DEL EXPERIMENTO

4.1.1. Parámetros de crecimiento

4.1.1.1. Materia seca acumulada a inicio y final del período crítico

En la Figura 3 se muestran los resultados obtenidos sobre MS depositada a inicios (R4) y final (R6) del PC, no se encontraron diferencias significativas a través de los diferentes tratamientos tanto en R4 como en R6. Sin embargo el T5 fue el tratamiento que tuvo menor deposición de MS tanto a inicio y como en el final del PC, obteniendo el 70% de la MS del T3, que fue el tratamiento que obtuvo el mayor valor.

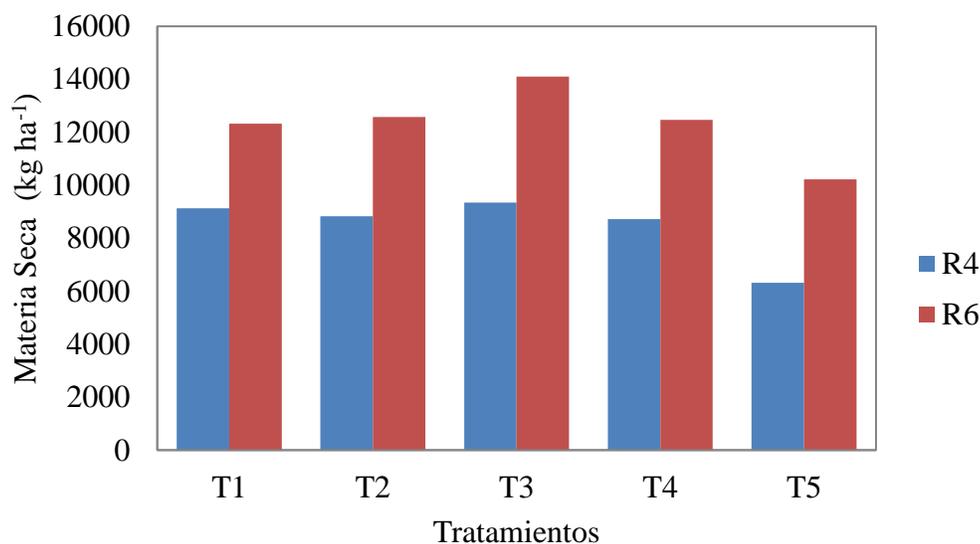


Figura 3. Materia seca (kg ha⁻¹) depositada a inicio (columnas azules) y final del período crítico (columnas rojas) en los diferentes tratamientos evaluados.

El T2 y el T3 tuvieron acumulaciones de MS al final del PC de 12579 y 14103 kg ha⁻¹, respectivamente. Estos tratamientos pudieron no expresar su potencial debido a la reducida RS incidente, ya que las mediciones realizadas indican valores menores a la media histórica durante todo el ciclo y en el PC (Cuadro 3). La baja RS incidente se debió al elevado número de días nublados y con altas PP que en esta temporada fueron de 400 y 194 mm superiores a la media (2002-12) durante todo el ciclo y PC, respectivamente.

Cuadro 3. Radiación solar diaria incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) durante el ciclo del cultivo y la media de la década anterior.

	Radiación solar diaria ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)	
	Ciclo	Período crítico
Media (2002-12)	20,0	20,2
Ensayo 2013-14	17,8	16,3

A pesar de que no se observaron diferencias significativas entre el T2 y el T5 los resultados obtenidos indican que la diferencia registrada entre los mismo está dada por las condiciones de deficiencias hídricas a las cuales estuvo expuesto el T5 durante la etapa vegetativa y un lapso de 10 días durante la floración, lo que no le permitió acumular valores similares de biomasa que el T2. La baja acumulación de MS del T5 concuerda con lo reportado por Dardanelli et al. (1991), los que indicaron que deficiencias hídricas en etapas reproductivas disminuyen significativamente la acumulación de MS por el cultivo. Por lo tanto debido a las deficiencias hídricas ocurridas, el T5 no desarrolló un canopeo que permitiera maximizar la intercepción de RS durante la etapa reproductiva temprana, obteniendo una baja acumulación de MS en el estadio R4.

Foster y Rovegno (2015) en el mismo año y campo experimental, trabajando en un ensayo de manejo de agua, con una variedad del GM V obtuvieron en el tratamiento de bienestar hídrico 10787 kg ha^{-1} de MS en R6. La diferencia existente con este trabajo, fue de 1792 kg ha^{-1} que dado las mismas condiciones de crecimiento, interpretamos que estas diferencias estarían dadas por el menor potencial de producción de MS del cultivar utilizado en este ensayo, explicado por la diferencia en largo de ciclo entre los cultivares.

Asimismo, Giménez (2014) reportó valores de 16168 kg ha^{-1} a R6 trabajando con una variedad del GM V en un ensayo llevado a cabo en la temporada 2010-11, el cual fue un año caracterizado por una mayor RS aproximadamente un 30% superior al presente ensayo, esto explicó mayoritariamente las diferencias de acumulación de MS.

Las diferencias entre la información reportada por los autores citados anteriormente y la presentada en la Figura 3, responden a la influencia que ejercen diversos factores ambientales y genéticos sobre la producción de MS. Los factores inherentes a las características del cultivo como GM afectan la fotosíntesis y la transpiración y por ende la producción de biomasa (Otegui, 2009).

4.1.1.2. Materia seca acumulada por planta a inicio y final del período crítico

Como se observa en la Figura 4 el T1 tuvo una mayor deposición de MS por planta a inicio y final del PC. El T2 obtuvo el 62% de acumulación de MS que el T1, como consecuencia de una población mayor y por ende más competencia entre plantas lo que provocó que cada planta tenga una acumulación menor de MS. El T4 fue el tratamiento que presentó menor MS por planta, el mismo acumuló el 30% de MS que el T1. Estos resultados muestran que con poblaciones menores la deposición de MS por planta aumentó. Board (2001) propone que este tipo de respuesta está explicada por mayores tasas relativas de expansión de hoja y una mayor intercepción de luz por planta en las poblaciones más bajas.

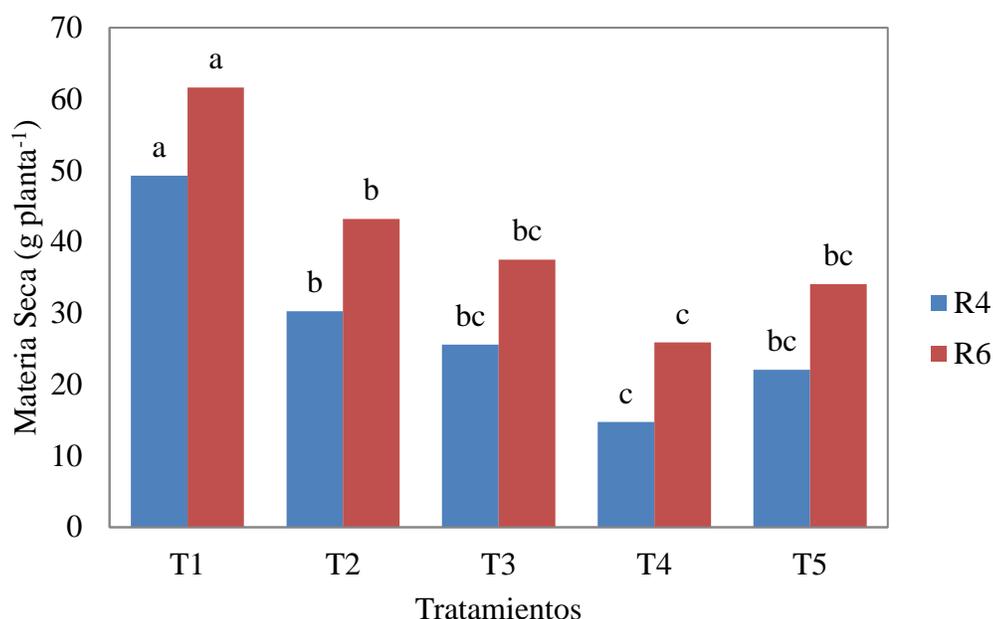


Figura 4. Materia seca (g planta⁻¹) por planta depositada a inicio (columnas azules) y final (columnas rojas) del período crítico en los diferentes tratamientos evaluados. Las columnas con letras iguales no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).

Las diferencias en MS depositada por planta entre los tratamientos coinciden con lo expresado por Wells (1993) quien manifestó que la soja en poblaciones bajas presentó una mayor tasa de asimilación neta y mayor tasa de crecimiento relativo del área foliar en comparación con la soja en poblaciones más altas. Estos factores son los que permiten al T1 lograr una mayor acumulación de MS por planta.

En la Figura 4 se observa que entre el T2 y el T5 no se detectaron diferencias significativas, sin embargo se observó una disminución de 27% de la MS del T5 con respecto al T2 a R4 y R6 lo que estaría dado por las condiciones de deficiencias hídricas a las cuales estuvo expuesto el T5 durante la etapa vegetativa y un lapso de 10 días aproximadamente durante la floración. Esta disminución en la acumulación de MS por planta coincide con lo expresado por Andrade y Sadras (2000b), quienes manifestaron que cultivos sometidos a deficiencias hídricas reducen la interceptación de radiación y/o disminuyen la eficiencia de conversión de radiación interceptada en biomasa. Esta reducción es consecuencia de una menor expansión de hojas y/o una mayor senescencia foliar.

Los resultados asimismo coinciden con los expresados por Andriani (2002) que asegura que deficiencias hídricas de mediana intensidad (contenidos hídricos de 40-50% de AU en el suelo) provocadas durante el período de emergencia-floración disminuyen el área foliar y la altura de planta, esto explicaría la disminución en la acumulación de MS por planta del T5 respecto del T2.

4.1.1.3. Efecto de la población sobre la tasa de crecimiento durante el período crítico

En la Figura 5, se puede observar que el T1 es el tratamiento que logró mayor TCP. El T2 presentó una disminución de 32% con respecto al T1. Por otra parte, existe una disminución en la TCP del T3 durante el mencionado período, en un valor de 57% con respecto al T1, mientras la disminución del T4 fue de 68%. Estos resultados muestran como en las poblaciones más bajas las TCP obtenidas son mayores y cómo al aumentar las poblaciones los valores de TCP disminuyen.

Este comportamiento coincide con lo expresado por Wells (1993), Board (2001) quienes explican que esta respuesta observada a poblaciones mayores es consecuencia de un aumento en la competencia entre plantas por recursos, provocando menores tasas de crecimiento relativo y de expansión foliar y una menor interceptación de luz por planta.

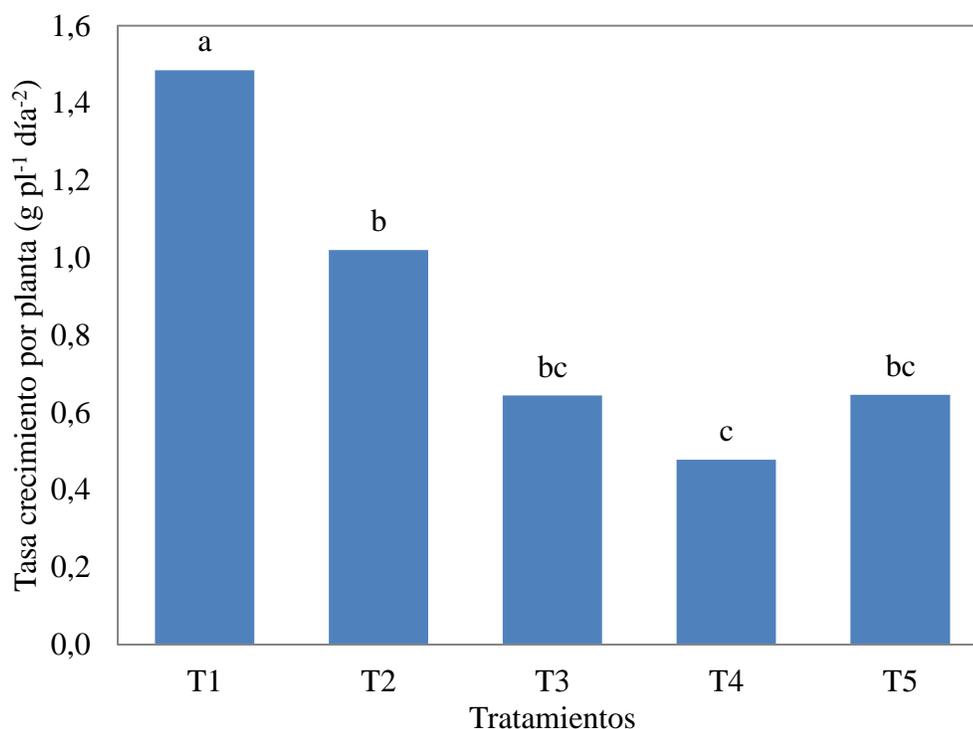


Figura 5. Tasa de crecimiento por planta ($\text{g pl}^{-1}\text{día}^{-2}$) entre inicio y fin del período crítico para los diferentes tratamientos evaluados. Las columnas con letras iguales no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).

Entre el T2 y el T5 no se detectaron diferencias significativas, sin embargo se observó una disminución de 36% del T5 con respecto al T2 que estaría dada por las condiciones de deficiencia hídrica ya mencionadas a las cuales estuvo expuesto el T5, lo que redujo la TCP durante este período y la acumulación de MS durante el PC. Estas disminuciones de rendimiento son similares a las reportadas por Andrade y Sadras (2000b), quienes indican que bajo condiciones de estrés hídrico la TCC se redujo 30% con respecto al testigo sin deficiencias.

En la Figura 6 se observa la relación entre la TCP y la población. Los resultados indican que la variación en la TCP está explicada en un 81% por la población. En la medida que aumenta la población disminuye la TCP, llegando a reducirse dos terceras partes por duplicar la población. La mayor competencia por espacio y recursos, principalmente el efecto sobre la interceptación de RS, no permite que la planta manifieste su potencial de crecimiento y fijación de biomasa.

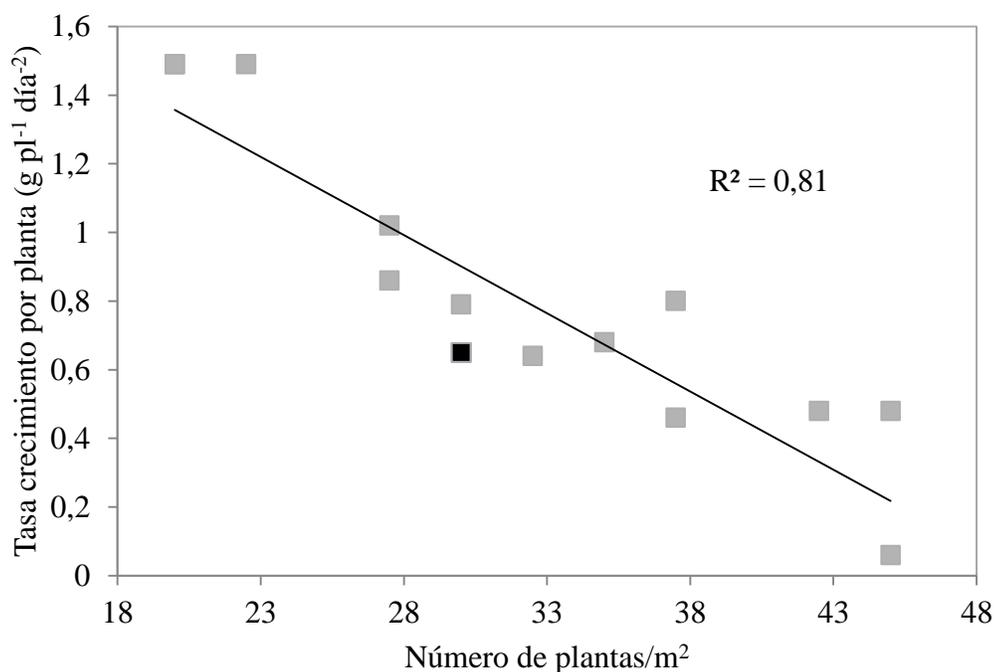


Figura 6. Relación entre la tasa de crecimiento por planta ($\text{g pl}^{-1}\text{día}^{-2}$) durante el período crítico (R4-R6) y la variación en la población (plantas/m^2) para tratamientos con riego (puntos grises) y tratamiento en seco (puntos negros).

4.1.1.4. Relación entre la tasa de crecimiento por planta durante el período crítico y el número de granos por planta

Como se observa en la Figura 7 el T1 tuvo un mayor NGP correspondiente con la mayor TCP obtenida. El T2 obtuvo el 80% de NGP que el T1, debido a una disminución del 30% en la TCP. Por otra parte, existió una disminución en el NGP del T3 durante el mencionado período, en un valor de 60% con respecto al T1. El T4 fue el tratamiento que presentó menor NGP, obteniendo el 50% con respecto al T1 como consecuencia de la menor TCP lograda, la cual fue 40% menor a la máxima. Estos resultados permiten establecer una relación proporcional entre TCP y NGP dado que las disminuciones en la TCP llevan a similares disminuciones en el NGP.

Los resultados obtenidos concuerdan con Valentinuz et al., Egli y Brander, citados por Andrade et al. (2000a) según los cuales el NGP se determina principalmente durante la fijación de vainas (R3 a R6) y es función de la TCP durante esta etapa.

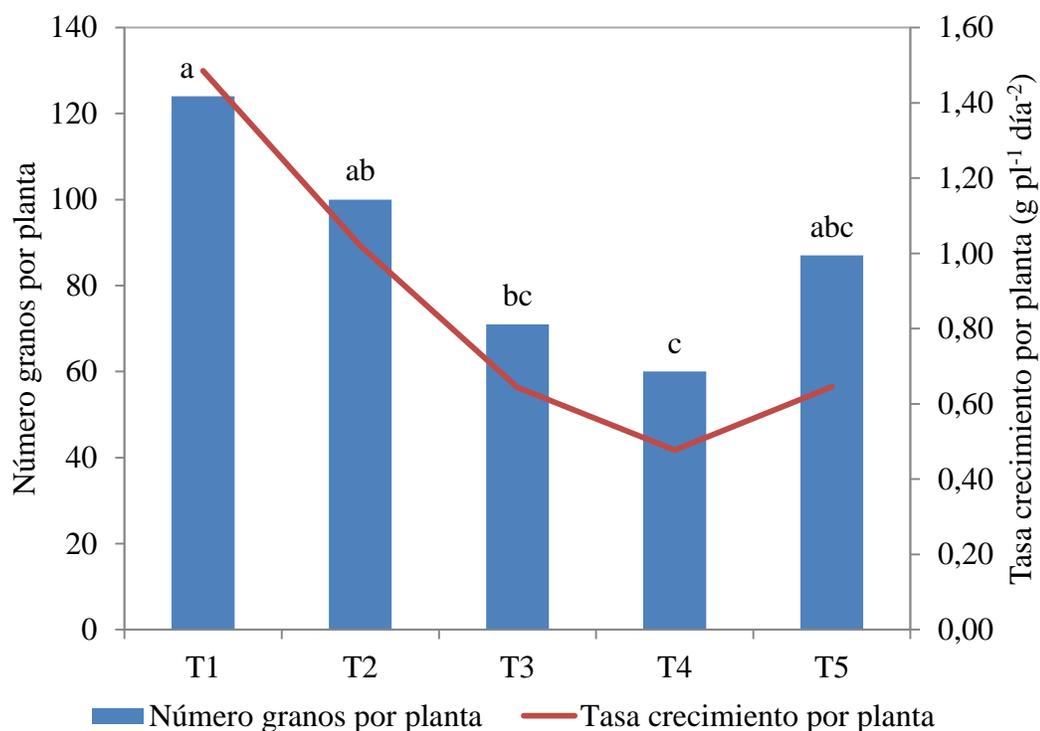


Figura 7. Número de granos por planta (columnas azules) y tasa de crecimiento por planta (línea roja, $\text{g pl}^{-1} \text{día}^{-2}$) entre inicios y fin del período crítico para los diferentes tratamientos evaluados. Las columnas con letras iguales no difieren entre sí ($p < 0,05$; Tukey).

En la Figura 8 se observa la relación lineal entre la TCP y el NGP. Según los resultados la variación en el NGP está explicada en un 81% por la TCP, este tipo de relación responde a un aumento en la disponibilidad de espacio y recursos. La relación obtenida coincide con lo expresado por Kantolic y Satorre (2004), quienes establecen que el NGP está relacionado con la TCC entre la etapa de floración y mediados de la fase de llenado de granos. Es así que tratamientos que modifican el crecimiento de la planta hasta R6 modificaran el NGP.

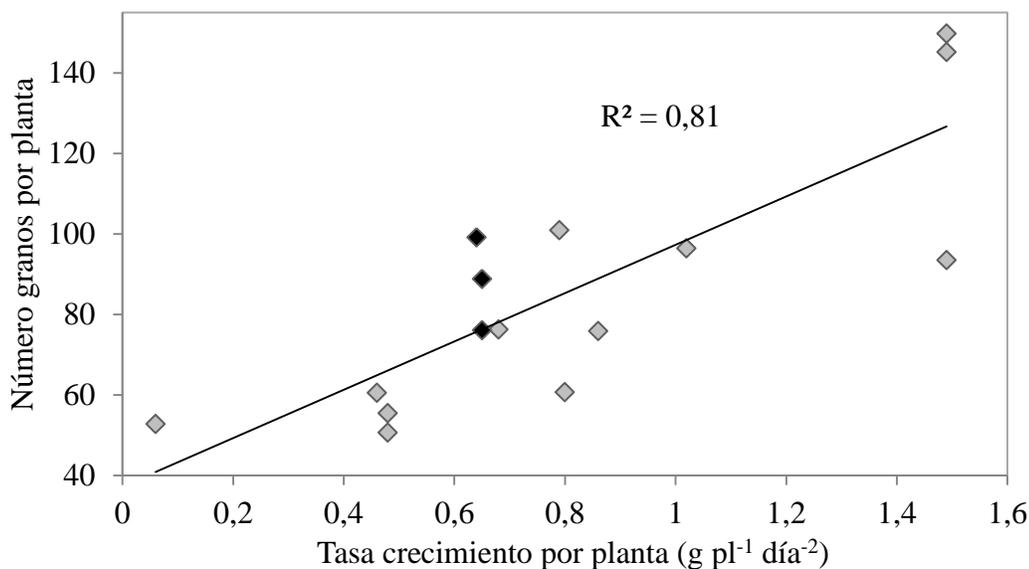


Figura 8. Relación entre la tasa de crecimiento por planta ($\text{g pl}^{-1}\text{día}^{-2}$) para tratamientos con riego (puntos grises) y tratamiento en secano (puntos negros) durante el período crítico (R4-R6) y el número de granos por planta, para tratamientos con riego (puntos grises) y tratamiento en secano (puntos negros).

4.1.2. Efecto de la población sobre el rendimiento

Como se muestra en la Figura 9 no se observaron diferencias significativas en rendimiento en grano ante el aumento de la población, obteniéndose como rendimiento promedio 3730 kg ha^{-1} . Los resultados obtenidos son coincidentes con varios estudios que reportaron un rendimiento constante en un amplio rango de poblaciones (Pedersen y Lauer 2002, Norsworthy y Frederick 2002).

Estos resultados a su vez coinciden con los logrados por Lee et al. (2008), Koger (2009) quienes afirman que se pueden obtener rendimientos óptimos en poblaciones finales muy bajas; además expresan que el rendimiento en soja es relativamente insensible a la población en una amplia gama de densidades de siembra, por lo que generalmente producen el mismo rendimiento.

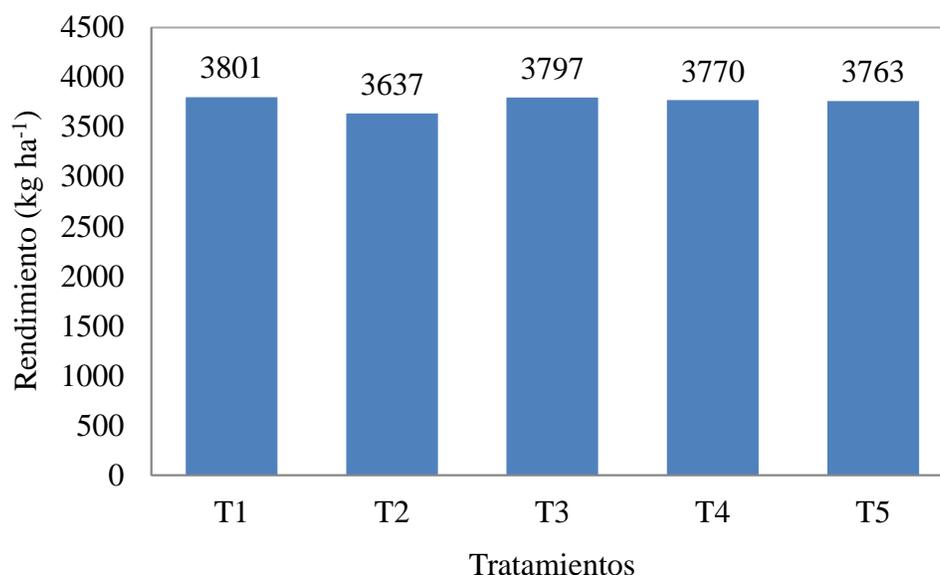


Figura 9. Rendimiento en grano (kg ha⁻¹) en los diferentes tratamientos evaluados. Las columnas con letras iguales no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).

Foster y Rovegno (2015) reportaron un rendimiento de 4611 kg ha⁻¹ en un experimento bajo condiciones de bienestar hídrico y una población comparable con el T2, la diferencia observada se atribuye al menor potencial genético de la variedad utilizada en este experimento. Asimismo el rendimiento obtenido fue inferior al reportado por Canosa y Prieto (2013) quienes lograron 6192 kg ha⁻¹ en tratamientos de bienestar hídrico con un cultivar del GM V. Dicho rendimiento fue alcanzado en un año climáticamente diferente, en el cual se registraron niveles de RS superiores a la media (2002-12) durante casi todo el ciclo del cultivo y 15% superiores con respecto a este ensayo, las PP presentaron una distribución acorde a la media histórica.

De la misma forma, Grasso y Montero (2011) utilizando un cultivar de GM V alcanzaron un rendimiento de 4885 kg ha⁻¹ para un año en que las PP fueron 56% mayores a la media histórica durante el ciclo del cultivo, lo que provocó una notoria disminución en la RS, pero igualmente se obtuvieron rendimientos 30% por encima de los niveles logrados en este ensayo.

En el presente ensayo el rendimiento potencial estuvo afectado por el exceso de PP de 200 mm superiores a la media, y por la menor RS la cual se ubicó 4 MJ m⁻² día⁻¹ por debajo de la media (2002-12) durante el PC, afectando así los rendimientos de todos los tratamientos.

Giménez (2014) en un año «Niña» (2010-11), reportó rendimientos de 7275 kg ha⁻¹ en condiciones de bienestar hídrico. Estas diferencias de rendimiento, se justifican principalmente por las características climáticas favorables de ese año, una alta RS incidente (27 y 30% mayor durante todo el ciclo y el PC respectivamente, con respecto al presente ensayo). Debido a esto, se expresó adecuadamente el potencial de producción que presenta la soja en los ambientes de producción del país, en condiciones de alta luminosidad y elevada disponibilidad hídrica (Giménez, 2014).

4.1.2.1. Relación entre el rendimiento y sus componentes

En el Cuadro 4 se resume el efecto de la población sobre los componentes principales del rendimiento.

Cuadro 4. Número de granos por metro cuadrado y peso promedio de granos (mg) en los diferentes tratamientos evaluados.

Tratamiento	Número de granos/m ²	Peso de mil granos promedio (g)
T1	2589	183
T2	2650	177
T3	2568	169
T4	2557	177
T5	2640	177

Las columnas con letras iguales no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).

No se encontraron diferencias significativas en el número de granos por superficie, ni en el peso promedio de grano. Ante el aumento de la población el número de granos/m² no se modificó. Estos resultados coinciden con los obtenidos en varios estudios (Pedersen y Lauer 2002, Norsworthy y Frederick 2002) quienes reportaron un rendimiento constante en un amplio rango de poblaciones a partir de iguales valores de número de granos/m². Además Baigorri (2004) tampoco observó diferencias en el número de granos/m² al variar la población, lo que indicó una notable capacidad compensatoria del cultivo, incluso en poblaciones muy bajas.

Se observa en el Cuadro 4 como el T5 no fue afectado por las condiciones de secano, lo que indica que a pesar de las deficiencias hídricas indicadas en el tratamiento de secano, las PP ocurridas posteriormente hicieron que el cultivo lograra igual número de granos por superficie que aquellos tratamientos con bienestar hídrico.

En lo que se refiere al peso promedio de grano, como se observa en el Cuadro 4, no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos. Estos resultados coinciden con los de Ferraris et al. (2003) quienes obtuvieron que ante cambios en la

población no fue afectado el peso del grano y con Jiménez (1995) el cual no encontró diferencias en el peso promedio del grano al variar la población.

La estabilidad del rendimiento que se obtiene al disminuir la población está dada por un aumento en el rendimiento por planta. En la Figura 10 se muestra la relación entre el rendimiento por planta y la población de plantas. A medida que el número de plantas por m^2 aumentó el rendimiento de las mismas disminuyó. La variación del rendimiento por planta estuvo explicada en un 86% por la población. Esta respuesta coincide con lo mencionado por Loomis y Connor (1992), Carpenter y Board (1997) quienes afirmaron que el logro de bajas poblaciones óptimas está relacionada con la capacidad de la soja para aumentar el rendimiento por planta a medida que la población disminuye.

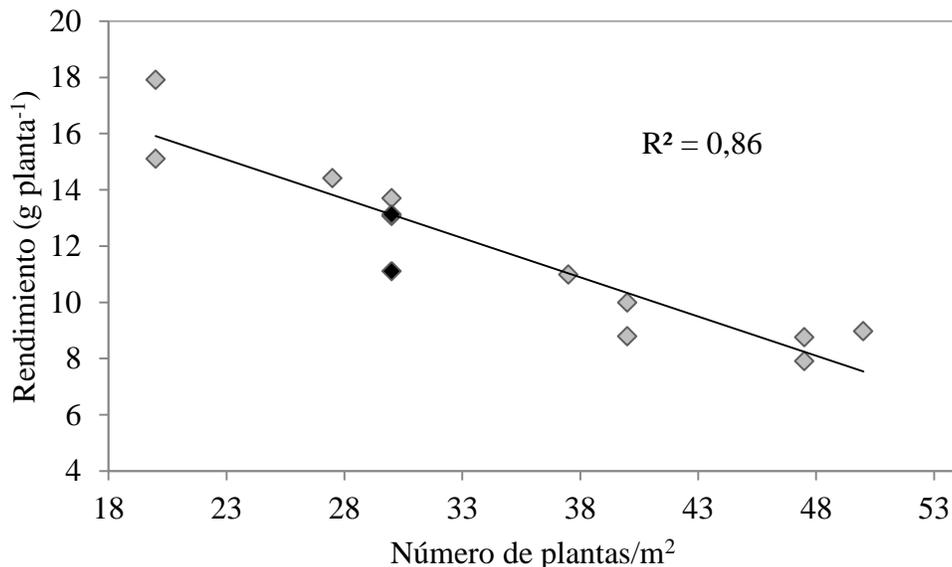


Figura 10. Rendimiento por planta ($g\ planta^{-1}$) según el número de plantas por metro cuadrado, para tratamientos con riego (puntos grises) y tratamiento en secano (puntos negros).

Este aumento en el rendimiento por planta es resultado de diferencias significativas en el número de granos por planta. En el Cuadro 5 se resume el efecto de la población sobre el número de granos por planta.

Cuadro 5. Número de granos por planta en los diferentes tratamientos evaluados.

Tratamiento	Número de granos por planta
T1	124 a
T2	100 ab
T5	87 bc
T3	71 bc
T4	60 c

Letras iguales indica que no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).

Como se observa en el Cuadro 5 se encontraron diferencias significativas en el NGP en los tratamientos, ante aumentos de la población se observó una disminución en el NGP. En el T1 se obtuvo una mayor cantidad de granos por planta. No se observaron diferencias significativas entre el T3 y el T5 teniendo ambos una reducción de aproximadamente 36% con respecto al T1. El T4 fue el tratamiento que obtuvo un menor NGP con una reducción de 51% con respecto al T1. Esto indicaría que al duplicar la población el NGP a se reduce a la mitad. Este comportamiento es similar al reportado por Andrade et al. (2000a) quienes encontraron que disminuciones de la población a un cuarto de la óptima incrementaron el NGP en 190%. Además Valentinuz et al., Egli y Brander, citados por Andrade et al. (2000a) reportaron que el aumento en la población entre 7,5 y 55 plantas/m² produjo una disminución de 260 a 50 granos por planta.

Para obtener un similar número de granos por m² en los distintos tratamientos, fue necesario que cada planta conforme a la disminución en población aumentara su aporte al número de grano por m². De acuerdo a lo indicado por Jiang y Egli (1993) a medida que la población aumenta, el crecimiento y el NGP disminuye como consecuencia de una menor oferta de recursos por individuo incrementando el aborto de vainas y de granos en la medida que los recursos para la planta son más limitantes.

En la Figura 11 se presenta el NGP ante cambios en la población. Los datos obtenidos indican que se redujo a la mitad el NGP al pasar de 20 pl/m² a 50 pl/m². Estos resultados muestran que la disminución en el NGP está explicada en un 86% por cambios en la población de plantas.

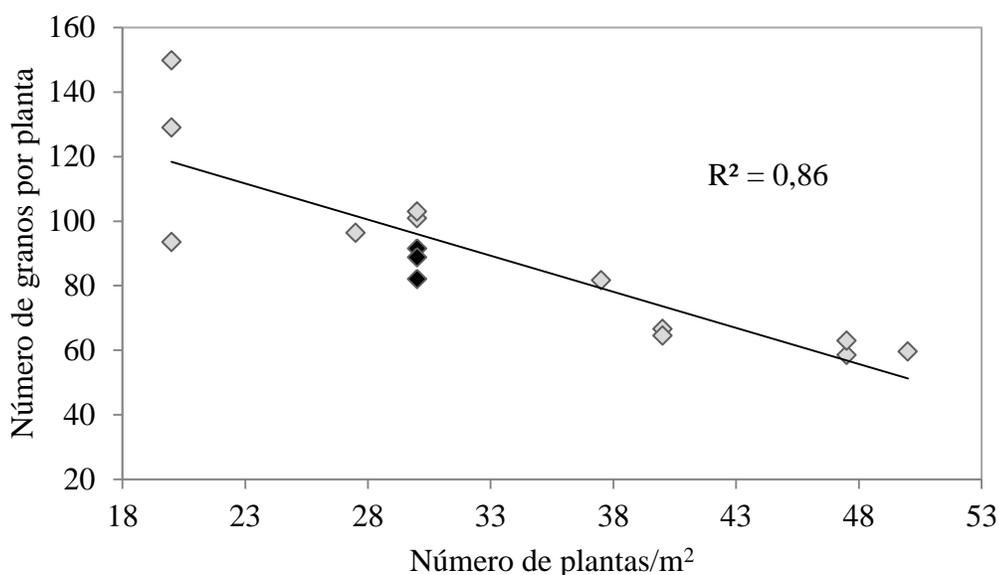


Figura 11. Número de granos por planta en función del número de plantas por metro cuadrado, para tratamientos con riego (puntos grises) y tratamiento en secano (puntos negros).

4.1.3. Efecto de la población sobre los sub-componentes de rendimiento

4.1.3.1. Número de vainas y número de nudos fértiles

En el Cuadro 6 se resume el efecto de la población sobre el número de vainas y número de nudos fértiles, por metro cuadrado y por planta, en las diferentes poblaciones estudiadas.

Cuadro 6. Número de vainas por metro cuadrado, número de nudos fértiles por metro cuadrado, número de vainas por planta y número de nudos por planta, en los diferentes tratamientos evaluados.

Tratamiento	Número de vainas/m ²	Número de nudos fértiles/m ²	Número de vainas por planta	Número de nudos fértiles por planta
T1	547 a	236 a	66 a	28 a
T2	503 a	196 a	49 ab	18 ab
T5	549 a	249 a	46 ab	20 ab
T3	481 a	217 a	34 b	15 ab
T4	517 a	246 a	31 b	14 b

Letras iguales en la misma columna indican que no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).

Como se observa en el Cuadro 6 no se encontraron diferencias significativas entre los distintos tratamientos para ninguna de las dos variables cuando las mismas fueron medidas por superficie. Estos resultados coinciden con los encontrados por Carpenter y Board (1997), Satorre (2003) para número de vainas y número de nudos fértiles respectivamente.

Cuando las variables se midieron por planta, se encontraron diferencias significativas en los tratamientos evaluados. En relación al número de vainas por planta ante aumentos de la población se observó una disminución en el número de vainas por plantas. El T1 fue el tratamiento en el que se obtuvo una mayor cantidad de vainas por planta. No se detectaron diferencias significativas entre el T2 y el T5 teniendo ambos una reducción de aproximadamente 28% en el número de vainas por planta con respecto al T1. El T3 y el T4 fueron los tratamientos que obtuvieron menores números de vainas por planta con una reducción de 50% con respecto al T1.

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Boquet (1990), Carpenter y Board (1997) quienes indicaron que el número de granos y número de vainas por planta suele reducirse aumentando la población de plantas debido a la mayor competencia por recursos, pero ésta reducción es más que compensada por el mayor número de plantas por metro cuadrado hasta una población óptima.

En la Figura 12 se observa como ante aumentos en la población el número de vainas por planta disminuye. El número de vainas por planta descendió un 50% conforme se duplicó la población (T1 vs T4). Según éstos resultados la disminución en el número de vainas por planta está explicada en un 80% por la población.

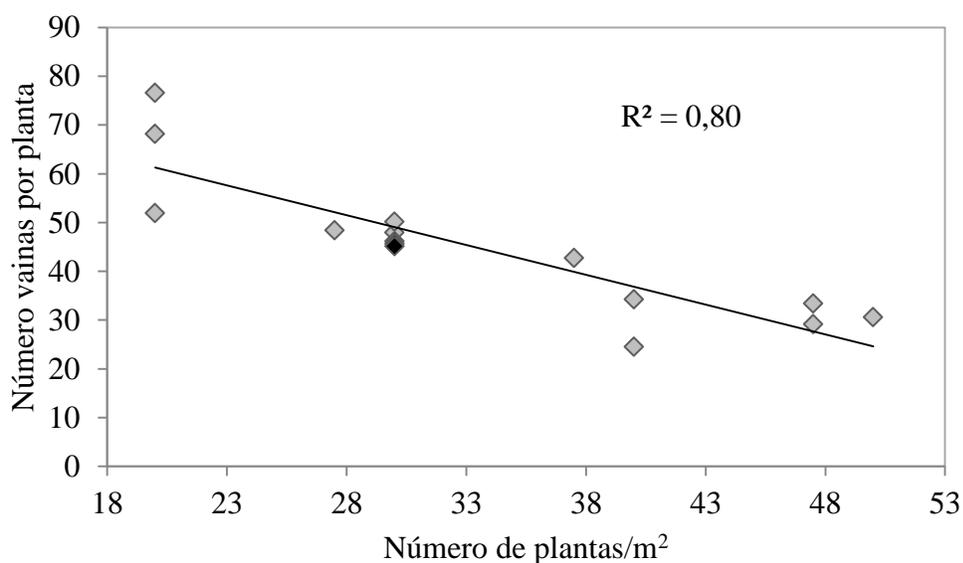


Figura 12. Número de vainas por planta en función del número de plantas por metro cuadrado, para tratamientos con riego (puntos grises) y tratamiento en seco (puntos negros).

En relación al número de nudos fértiles por planta se encontraron diferencias significativas entre el T1 y el T4. Ante aumentos de la población se observó una disminución en el número de nudos fértiles por planta. Esta disminución está explicada en un 54% por la población. El T1 fue el tratamiento que obtuvo una mayor cantidad de nudos fértiles por planta. No se observaron diferencias significativas entre el T2 y el T3 teniendo ambos una reducción de aproximadamente 40% en el número de nudos fértiles por planta respecto al T1. El T4 fue el tratamiento que obtuvo el menor número de nudos fértiles por planta con una reducción de 68% con respecto al T1. Estas diferencias son el resultado de la capacidad compensatoria del cultivo frente a los cambios en la población. Esto coincide con lo reportado por Díaz-Zorita y Duarte (2004) que afirmaron que una mayor población de plantas es compensada por un menor número de nudos fértiles por planta y además por una disminución de la fertilidad de cada nudo.

Las diferencias observadas en los tratamientos evaluados cuando estas variables son medidas por planta son el resultado de la capacidad compensatoria del cultivo frente a cambios en la población. El hecho de duplicar la misma generó un comportamiento similar en ambas variables, ya que se redujo a la mitad tanto el número de vainas por planta como el número de nudos fértiles por planta.

Asimismo se observa en el Cuadro 6 como el T5 no fue afectado por las condiciones de secano en ambas variables, lo que indica que a pesar de las deficiencias hídricas ocurridas en el tratamiento de secano, las PP posteriores provocaron que el cultivo lograra igual número de granos por superficie que aquellos tratamientos con bienestar hídrico.

4.1.4. Efecto de la población sobre la altura de planta

En el Cuadro 7 se resume el efecto de la población sobre la altura de planta a inicio del PC.

Cuadro 7. Efecto de la población sobre la altura de planta a inicio del período crítico.

Tratamiento	Altura (cm)
T4	122 a
T3	118 a
T2	111 ab
T1	105 ab
T5	94 b

Las columnas con letras iguales no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).

En el Cuadro 7 se aprecia que se encontraron diferencias significativas en la altura de planta en los tratamientos evaluados dado que ante aumentos en la población se observó un incremento de la misma. El T3 y el T4 obtuvieron una mayor altura de planta mientras que no se observaron diferencias significativas entre el T1 y el T2 teniendo ambos una reducción de aproximadamente de 10% con respecto al valor máximo. No obstante como se puede observar en el Cuadro 6 la mayor altura de planta del T3 y del T4 frente al T1 y al T2 no implicó un mayor número de nudos fértiles. El T5 fue el tratamiento que presentó menor altura de planta con una reducción de 22% con respecto al T3 y el T4, tratamientos entre los cuales no se observaron diferencias significativas. La respuesta del T5 puede ser explicada por las condiciones de estrés hídrico a las cuales estuvo expuesto durante el período vegetativo y parte de la etapa de floración.

Este comportamiento es atribuido a que plantas con mayor población alargan sus entrenudos en busca de luz y llegan a presentar alturas mayores, a diferencia de las que se encuentran a menor población, las cuales permanecen más bajas por presentar más espacio cada una. Por lo que las plantas al encontrarse a una mayor población, pudieron haber sufrido restricciones de luz, lo que llevo a que alargaran sus entrenudos en busca de superar esta limitante, no sufriendo ningún otro tipo de déficit, ya que las lluvias en etapas avanzadas del cultivo, se dieron de forma adecuada a los requerimientos del cultivo.

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Goos y Johnson (2001) los cuales observaron un aumento de la altura con el incremento de la población debido a la competencia intraplanta. Del mismo modo De Bruin y Pedersen (2008) obtuvieron alturas mayores de planta en aquellas poblaciones superiores.

5. CONCLUSIONES

El ensayo consistió en evaluar un rango amplio de población en soja que fue de 200.000 a 500.000 plantas ha^{-1} bajo condiciones de bienestar hídrico. Los resultados mostraron que no se encontraron diferencias en el rendimiento en grano. Este comportamiento es explicado por la capacidad de compensación que presentaron las poblaciones menores evaluadas (200.000-300.000 plantas ha^{-1}).

Esta respuesta observada a los cambios en la población, se debió a la capacidad del cultivo de adaptarse a los diferentes grados de competencia entre plantas y por ende a la disponibilidad de recursos (agua, nutrientes, luz). A poblaciones menores los recursos por planta fueron mayores lo que permitió obtener una mayor TCP y a su vez determinó un mayor número de granos por planta. De esta manera se logró compensar el mismo número de granos por superficie que se lograron en poblaciones mayores.

Se comprobó la hipótesis de que al aumentar la población el rendimiento se mantuvo constante ya que poblaciones superiores a 200.000 plantas ha^{-1} no produjeron efectos positivos en el rendimiento, generando la posibilidad de disminuir el número de plantas/ m^2 utilizado en general actualmente. Los resultados obtenidos sugieren que al no haber diferencias significativas entre las poblaciones, el valor recomendado de población bajo estas condiciones es de 200.000 plantas por hectárea para la variedad DM 6200.

El tratamiento en secano no presentó diferencias en relación a los tratamientos bajo bienestar hídrico debido al volumen y la distribución de las PP que se adecuó a los requerimientos del cultivo. Es así que no fue posible evaluar si el déficit hídrico impacta sobre la capacidad compensatoria de la variedad utilizada.

Dado que la información nacional es escasa en este aspecto del manejo del cultivo se plantea continuar la investigación con otras variedades de diferente GM debido a las importantes diferencias que existen en la capacidad compensatoria de los mismos y por ende en la respuesta al aumento o disminución de las poblaciones utilizadas.

6. RESUMEN

Se desarrolló un experimento de soja (*Glycine max, L.*) en la Estación Experimental “Dr. M. A. Cassinoni” de la Facultad de Agronomía situada en Paysandú, Uruguay, en el verano 2013-14. El ensayo consistió en evaluar el efecto de distintas poblaciones sobre el rendimiento y sus componentes bajo condiciones hídricas no limitantes. Se evaluaron cinco tratamientos, T1= 200.000 pl finales ha⁻¹, T2= 295.000 pl finales ha⁻¹, T3= 385.000 pl finales ha⁻¹, T4= 475.000 pl finales ha⁻¹ en condiciones de bienestar hídrico y T5= 300.000 pl finales ha⁻¹ en condiciones de secano. El bienestar hídrico se logró mediante el uso de riego suplementario. Se realizó el análisis de la varianza donde se descompone la misma en los componentes del modelo, observándose que no existieron diferencias entre los tratamientos propuestos para las diferentes poblaciones lo que se atribuye a la capacidad compensatoria de la variedad utilizada, obteniéndose un rendimiento promedio de 3,7 t ha⁻¹. Los componentes del rendimiento que explicaron la compensación de las distintas poblaciones fueron el número de granos y de vainas por planta, esto permitió lograr un mismo número de vainas y granos por superficie. El peso promedio de mil granos no se vio afectado al modificar las poblaciones. En la acumulación de MS y en la TCC durante el PC no se encontraron diferencias entre poblaciones, pero sí para la TCP, comportamiento que permitió al cultivo compensar el rendimiento en las distintas poblaciones. Los resultados indican que bajo condiciones de bienestar hídrico durante todo el ciclo los cambios en las poblaciones no produjeron diferencias significativas en el rendimiento en grano por lo que se sugiere un valor óptimo de población de 200.000 plantas por hectárea para la variedad evaluada DM 6200.

Palabras clave: *Glycine max*; Población; Radiación solar incidente; Rendimiento; Período crítico.

7. SUMMARY

An experiment of soybean (*Glycine max*, L.) was developed at the Experimental Station Dr. MA Cassinoni of Faculty of Agronomy located in Paysandú, Uruguay, in the 2013-14 summer. The test consisted in evaluating the effect of different populations on yield and its components under no limiting water conditions. Five treatments were evaluated: T1= 200,000 end plants ha⁻¹, T2= 295,000 end plants ha⁻¹, T3= 385,000 end plants ha⁻¹, T4= 475,000 end plants ha⁻¹ under adequate water supply and T5= 300,000 end plants ha⁻¹ in drought conditions. The adequacy of water supply was achieved by the use of supplemental irrigation. An analysis of variance was performed, in which the components of the model were split, showing no differences between the proposed treatments for different populations. This is attributed to the compensatory ability of the variety used. The average yield obtained was of 3.7 t ha⁻¹. The yield components that explained the compensation of different populations were the grains and the number of pods per plant. The same number of pods and grains per area was achieved therefore. The average weight of a thousand beans was not affected by changing populations. No differences were found among the populations in the accumulation of MS and TCC during the PC, but differences did appear in the TCP presence. Such behavior allowed the crops to compensate the yield in the different populations. The results indicate that if the crops were under adequate water supply throughout the cycle, changes in populations did not produce significant differences in bean yield, so, for the evaluated variety DM 6200, an optimum population of 200,000 plants per hectare is suggested.

Keywords : *Glycine max*; Population; Solar radiation; Performance; Critical period.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Ablett, G. R.; Beversdorf, W. D.; Dirks, V. A. 1991. Row width and seeding rate performance of indeterminate, semideterminate, and determinate soybean. *Journal of Production Agriculture*. 4(3): 391-400.
2. Andrade, F. H. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Research*. 41(1): 1-12.
3. _____.; Aguirrezabal, L.; Rizzalli, R. 2000a. Crecimiento y rendimiento comparado. *In*: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, EEA INTA Balcarce/ UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 61-96.
4. _____.; Sadras, V. O. 2000b. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. *In*: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, EEA INTA Balcarce/ UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 173-206.
5. _____.; Calvino, P.; Cirilo, A.; Barbieri, P. 2002. Yield responses to narrow rows depend on increased radiation interception. *Agronomy Journal*. 94(5): 975-980.
6. Andriani, J. M. 2002. Estrés hídrico en soja. *IDIA XXI*. 2 (3): 48-51.
7. Alessi, J.; Power, J. F. 1982. Effects of plant and row spacing on dryland soybean yield and water-use efficiency. *Agronomy Journal*. 74(5): 851-854.
8. Baigorri, H. 1997. Elección de cultivares. *In*: Giorda, L.; Baigorri, H. E. eds. El cultivo de la soja en Argentina. Córdoba, Argentina, INTA Córdoba. pp. 102-105.
9. _____.; Croatto, D. 2000. Manejo del cultivo de soja en Argentina. Marcos Juárez, INTA. 28 p.
10. _____. 2004. Criterios para la elección y el manejo de cultivares de soja. Marcos Juárez, INTA. 21 p.
11. Ball, R. A.; Purcell, L. C.; Vories, E. D. 2000. Optimizing soybean plant population for a short-season production system in the southern USA. *Crop Science*. 40(3): 757-764.
12. Barrios, M. 2009. Efecto del sistema de manejo de suelo en el desarrollo de raíces, absorción de agua y productividad en una rotación soja trigo en la Pcia. Buenos Aires, Argentina. Tesis Doctoral. Córdoba, Argentina. Universidad de Córdoba. 212 p.

13. Beuerlein, J.; Dorrance, A. 2005. Soybean production. *In*: Smith, K. L. dir. Ohio agronomy guide. 14th. ed. Columbus, OH, Ohio State University Extension. pp. 57-71.
14. Bidegain, S. A. 2012. Cuantificación de la respuesta en rendimiento en grano en el cultivo de soja en función de la capacidad de almacenaje de agua del suelo, contenido de agua inicial y distribución de precipitaciones durante el ciclo del cultivo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 34 p.
15. Board, J. E.; Harville, B. G. 1994. A criterion for acceptance of narrow-row culture in soybean. *Agronomy Journal*. 86(6): 1103-1106.
16. _____. 2000. Light interception efficiency and light quality effect yield compensation of soybean at low populations. *Crop Science*. 40:1285-1294.
17. _____. 2001. Reduced lodging for soybean in low plant population is related to light quality. *Crop Science*. 41:379-384.
18. _____. 2004. Soybean cultivar differences on light interception and leaf area index during seed filling. *Agronomy Journal*. 96:305-310.
19. Bodrero, M. 2003. Algunos factores genéticos y ambientales que influyen sobre el rendimiento de la soja. *In*: Jornada Nacional de la Soja (2003, Colonia). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 1- 13 (Actividades de Difusión no. 325).
20. Boquet, D. J.; Walker, D. M. 1980. Seeding rates for soybeans in various planting patterns. *Louisiana Agriculture*. 23(3): 22-23.
21. _____. 1990. Plant population density and row spacing effects on soybean at post-optimal planting dates. *Agronomy Journal*. 82(1): 59-64.
22. Bowers, G. R.; Rabb, J. L.; Ashlock, L. O.; Santini, J. B. 2000. Row spacing in the early soybean production system. *Agronomy Journal*. 92(3): 524-531.
23. Bullock, D.; Khan, S.; Rayburn, A. 1998. Soybean yield response to narrow rows is largely due to enhanced early growth. *Crop Science*. 38(4): 1011-1016.
25. Canosa, G.; Prieto, C. 2013. Estudio del efecto de las deficiencias hídricas sobre el rendimiento de soja. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 66 p.
26. Carpenter, A. C.; Board, J. E. 1997. Branch yield components controlling soybean yield stability across plant populations. *Crop Science*. 37(3): 885-891.
27. Castaño, J. P.; Ceroni, M.; Giménez, A.; Furest, J.; Aunchayna, R. 2010. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009. (en línea).

- Montevideo, INIA. 28 p. Consultado 30 jun. 2014. Disponible en <http://www.inia.org.uy/gras/agroclima/cara-agro/ind>
28. Cárcova, J.; Abeledo, L. G.; López, M. 2003. Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes. *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, Facultad de Agronomía. pp. 75-98.
 29. Chen, G.; Wiatrak, P. 2011. Seeding rate effects on soybean height, yield, and economic return. *Agronomy Journal*. 103(5): 1301-1307.
 30. Christmas, E. P. 1993. Plant populations and seeding rates for soybeans; agronomy guide. Purdue University. Cooperation Extension Center. Bulletin AY-217. 220 p.
 31. Cooper, R. L.; Jeffers, D. L. 1984. Use of nitrogen stress to demonstrate the effect of yield limiting factors on the yield response of soybean to narrow row systems. *Agronomy Journal*. 76: 257-259.
 32. Cox, W.; Cherney, J. H. 2011. Growth and yield responses of soybean to row spacing and seeding rate. *Agronomy Journal*. 103(1): 123-128.
 33. Currié, H.; Iván, E.; Caseres, S. L. 2006. Análisis de la oferta de agua y el uso consuntivo para los cultivos de soja y girasol en el área de influencia de La Tigra, Chaco. (en línea). Corrientes, Universidad Nacional del Nordeste. Facultad de Ciencias Agrarias. 4 p. Consultado 28 feb. 2012. Disponible en <http://www.fcagr.unr.edu.ar/Extension/Agromensajes/31/2AM31.htm>
 34. Dardanelli, J. L.; Suero, E. E.; Andrade, F. H.; Andriani, J. 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans. II. Water use and water deficiency indicators. *Agronomie*. 11: 747-756.
 35. De Bruin, J. L.; Pedersen, P. 2008. Effect of row spacing and seeding rate on soybean yield. *Agronomy Journal*. 100(3): 704-710.
 36. Desclaux, D.; Roumet, P. 1996. Impact of drought stress on the phenology of two soybean (*Glycine max* L. Merr) cultivars. *Field Crops Research*. 46(1): 61-70.
 37. Devlin, D. L.; Fjell, D. L.; Shroyer, J. P.; Gordon, W. B.; Marsh, B. H.; Maddux, L. D.; Duncan, S. R. 1995. Row spacing and seeding rates for soybean in low and high yielding environments. *Journal of Production Agriculture*. 8(2): 215-222.
 38. Díaz, R. 1984. Potencial y riesgo de producción de cultivos extensivos en Uruguay. *Revista de la Asociación de Ingenieros Agrónomos*. 2(2): 62-86.

39. Díaz-Zorita, M.; Duarte, A. G. 2004. Manual práctico para la producción de soja. Buenos Aires, Hemisferio Sur. 256 p.
40. Donatelli, M.; Hammer, G. L.; Vanderlip, R. L. 1992. Genotype and water limitation effects on phenology, growth, and transpiration efficiency in grain sorghum. *Crop Science*. 32(3): 781-786.
41. Duncan, W. G. 1986. Planting patterns and soybean yields. *Crop Science*. 26(3): 584-588.
42. Edwards, J. T.; Purcell, L. C.; Karcher, D. E. 2005. Soybean yield and biomass responses to increasing plant population among diverse maturity groups II. Light interception and utilization. *Crop Science*. 45:1778-1785.
43. Egli, D. B.; Guffy, R. D.; Leggett, J. E. 1985. Partitioning of assimilate between vegetative and reproductive growth in soybean. *Agronomy Journal*. 77(6): 917-922.
44. _____. 1988. Plant density and soybean yield. *Crop Science*. 28(6): 977-981.
45. _____. 1994. Mechanisms responsible for soybean yield response to equidistant planting patterns. *Agronomy Journal*. 86:1046-1049.
46. _____.; Bruening, W. P. 2000. Potential of early-maturing soybean cultivars in late plantings. *Agronomy Journal*. 11: 532-537.
47. _____.; _____. 2006. Temporal profiles of pod production and pod set in soybean. *European Journal of Agronomy*. 24(1): 11-18.
48. Elmore, R. W. 1991. Soybean cultivar response to planting rate and tillage. *Agronomy Journal*. 83(5): 829-832.
49. _____. 1998. Soybean cultivar responses to row spacing and seeding rates in rainfed and irrigated environments. *Journal of Production Agriculture*. 11(3): 326-331.
50. Ernst, O.; Mazzilli, S.; Siri-Prieto, G. 2009. Manejo de la reserva de agua del suelo para situaciones de estrés hídrico. In: Simposio Nacional de Agricultura de Secano (1°, 2009 Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Paysandú, Uruguay, Facultad de Agronomía. Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni. pp. 33-48.
51. Ethredge, W. J.; Ashley, D. A.; Woodruff, J. M. 1989. Row spacing and plant population effects on yield components of soybean. *Agronomy Journal*. 81(6): 947-951.

52. Fehr, W. R.; Caviness, C. E. 1977. Stages of soybean development. Iowa State University. Cooperative Extension Service. Special report no. 80. pp. 929-931.
53. Ferraris, G. N.; Couretot, L. A.; González, N. C. 2003. Densidad de siembra y espaciamientos en soja; efecto sobre los rendimientos y la estructura de la planta, campaña 2002/03. (en línea). Pergamino, INTA. pp. 86-92. Consultado 20 ene. 2015. Disponible en http://m.agrositio.com/vertex.php?id=20691&area_id=2
54. Frederick, J. R.; Woolley, J. T.; Hesketh, J. D.; Peters, D. B. 1989. Phenological responses of old and modern soybean cultivars to air temperature and soil moisture treatment. *Field Crops Research*. 21(1): 9-18.
55. Foster, P.; Rovigno, F. 2015. Efectos de diferentes disponibilidades hídricas en distintas etapas fisiológicas de soja sobre el rendimiento. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 68 p.
56. García, F. O. 2009. Introducción; marco de referencia del simposio. In: Simposio Nacional de Agricultura de Secano (1°, 2009 Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Paysandú, Uruguay, Facultad de Agronomía. Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni. pp. 3-5.
57. Gerster, G.; Bacigaluppo, S. 2009. Cómo alcanzar altos rendimientos en soja. INTA. Para Mejorar la Producción. no. 42: 63-67.
58. Giménez, L. 2004. Potencial de rendimiento de maíz para grano. *Cangüé*. no. 26: 33-38.
59. _____. 2007. Comportamiento fenológico de diferentes grupos de madurez de soja (*Glicine max*) en Uruguay. Ubicación temporal del período crítico. *Agrociencia* (Montevideo). 11 (2): 1-9.
60. _____.; García Petillo, M. 2009. Estudio de las necesidades hídricas de los cultivos de verano en Uruguay. In: Simposio Nacional de Agricultura de Secano (1°, 2009 Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Paysandú, Uruguay, Facultad de Agronomía. Estación Experimental Dr. Mario Cassinoni. pp. 17-32.
61. _____.; García Petillo, M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia* (Montevideo). 15(2): 100-108.
62. _____. 2014. Efecto de las deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo sobre el rendimiento de soja. *Agrociencia* (Montevideo). 18(1): 53-64.

63. Goos, R. J.; Johnson, B. 2001. Seed treatment, seeding rate, and cultivar effects on iron deficiency chlorosis of soybean. *Journal of Plant Nutrition*. 24(8): 1255-1268.
64. Grasso, J. P.; Montero, J. A. 2011. Efecto de diferentes disponibilidades hídricas sobre el rendimiento de soja. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 56 p.
65. Heatherly, L. G.; Elmore, R. W. 2004. Managing inputs for peak production. *In*: Boerma, H. R.; Specht, J. E. eds. Soybeans; improvement, production and uses. 3rd. ed. Madison, WI, ASA/CSSA/SSSA. pp. 451-536 (Agronomy Monography no. 16).
66. Heitholt, J. J.; Farr, J. B.; Eason, R. 2005. Planting configuration and cultivar effects on soybean production in low yield environments. *Crop Science*. 45:1800-1808.
67. Herbek, J. H.; Bitzer, M. J. 1988. Soybean production in Kentucky part III; Planting practices and double cropping. University of Kentucky. Cooperative Extension Service. Bulletin no. 130: 83-88.
68. Holshouser, D. L.; Whittaker, J. P. 2002. Plant population and row-spacing effects on early soybean production systems in the Mid-Atlantic USA. *Agronomy Journal*. 94(3): 603-611.
69. _____; Jones, B. P. 2003. Early-maturing double-crop soybean requires higher plant population to meet leaf area requirements. *Crop Management*. 2(1): 150-161.
70. Jiang, H.; Egli, D. B. 1993. Shade induced changes in flower and pod number and flower and fruit abscission in soybean. *Agronomy Journal*. 85(2): 221-225.
71. _____; _____. 1995. Soybean seed number and crop growth rate during flowering. *Agronomy Journal*. 87(2): 264-267.
72. Jiménez, A. L. 1995. Efecto de la densidad de población sobre los componentes del rendimiento en soja. (en línea). *Investigación y Ciencia (México)*. 5(15): 9-15. Consultado 25 ene. 2015. Disponible en <http://www.uaa.mx/investigacion/revista/archivo/revista15/Articulo%202.pdf>
73. Kane, M. V.; Grabau, L. J. 1992. Early planted, early maturing soybean cropping system; growth, development, and yield. *Agronomy Journal*. 84(5):769-773.
74. Kantolic, G.; 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.; Benech Arnold, R. L.; Slafer, G. A.; De La Fuente, E. B.; Miralles, D. J.;

- Otegui, M. E.; Savin, R. eds. Producción de granos; bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Argentina, Facultad de Agronomía. pp. 167-186.
75. _____.; Satorre, E. H. 2004. Elementos centrales de ecofisiología del cultivo de soja. *In*: Díaz-Zorita, M.; Duarte, G. A. eds. Manual práctico para la producción de soja. Buenos Aires, Argentina, Hemisferio Sur. pp. 19-37.
76. Koger, C. H. 2009. Optimal plant populations/seeding rates for soybean. (en línea). Raymond, Mississippi State University. Extension Service. s.p. Consultado 20 ene. 2015. Disponible en <http://msucares.com/crops/soybeans/seeding09.pdf>
77. Kratochvil, R. J.; Pearce, J. T.; Harrison, M. R. 2004. Row-spacing and seeding rate effects on glyphosate-resistant soybean for Mid-Atlantic production systems. *Agronomy Journal*. 96(4): 1029-1038.
78. Lee, C. D.; Egli, D. B.; Tekrony, D. M. 2008. Soybean response to plant population at early and late planting dates in the Mid-South. *Agronomy Journal*. 100(4): 971-976.
79. Loomis, R. S.; Connor, D. J. 1992. Community concepts. *In*: Loomis, R. S.; Connor, D. J. eds. Crop ecology; productivity and management in agriculture systems. Cambridge, UK, Cambridge University. pp. 32-59.
80. MDN. DNM (Ministerio de Defensa Nacional. Dirección Nacional de Meteorología, UY). 2014. El verano 2014. (en línea). Montevideo. 4 p. Consultado 15 nov. 2014. Disponible en <http://meteorologia.gub.uy/reportes/dcd/verano.pdf>
81. Melgar, R.; Vitti, G.; Melo Benitez, V. 2011. Soja en latinoamérica. Instituto Internacional de la Potasa. Boletín no. 20: 25-48.
82. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2014. Encuesta agrícola “invierno 2014”. (en línea). Montevideo. 3 p. Consultado 15 nov. 2014. Disponible en [file:///C:/Users/hp/Downloads/COMUNICADO+Prensa+AGRICOLA+INVIERNO+2014+\(Final+Editado\).pdf](file:///C:/Users/hp/Downloads/COMUNICADO+Prensa+AGRICOLA+INVIERNO+2014+(Final+Editado).pdf)
83. Miralles, D. J.; Windauer, L. B.; Gomez, N. V. 2003. Factores que regulan el desarrollo de los cultivos de granos. *In*: Satorre, E. H.; Benech Arnold, R. L.; Slafer, G. A.; de La Fuente, E. B.; Miralles, D. J.; Otegui, M. E.; Savin, R. eds. Producción de granos; bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Argentina, UBA. Facultad de Agronomía. pp. 61-71.
84. Molfino, J.; Califra, A. 2001. Agua disponible en las tierras del Uruguay; segunda aproximación. Montevideo, MGAP. 12 p.

85. Mondino, M.; Gómez, D. 2006. Evolución de la interceptación de la radiación incidente y la producción de biomasa en soja de siembras extra tempranas a diferentes espaciamientos. *In*: Congreso de Soja del MERCOSUR (3°, 2006, Buenos Aires, Argentina). Ecofisiología y climatología. Entre Ríos, AR, Facultad de Ciencias Agropecuarias. pp. 83-86.
86. Norsworthy, J. K.; Frederick, J. R. 2002 Reduced seeding rate for glyphosate-resistant, drilled soybean on the southeastern Coastal Plain. *Agronomy Journal*. 94(6): 1282-1288.
87. Otegui, M. E. 2009. Bases ecofisiológicas para el manejo del agua en cultivos para grano conducidos en secano. *In*: Simposio Nacional de Agricultura de Secano (1°, 2009 Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Paysandú, Uruguay, Facultad de Agronomía. Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni. pp. 7- 16.
88. Pedersen, P.; Lauer, J. G. 2002. Influence of rotation sequence on the optimum corn and soybean plant population. *Agronomy Journal*. 94(5): 968-974.
89. Pereira, L.; Arturo de Juan, J.; Picornell Bendia, M. R.; Tarjeulo, J. M. 2010. El riego y sus tecnologías. Lisboa, Portugal, Universidade de Lisboa. Trapada da Ajuda. CEER. Centro de Engenharia dos Biosistemas. Instituto Superior de Agronomia. 296 p.
90. Popp, M. P.; Edwards, J. T.; Purcell, L. C.; Manning, P. M. 2006. Profit-maximizing seeding rates and replanting thresholds for soybean: Maturity group interactions in the Mid-South. *Agricultural Systems*. 91(3): 211-228.
91. Quijano, A.; Morandi, E. N.; Martignone, R. A.; Bodrero, M. L. 1996. Número de semillas y rendimiento en soja en relación a la época de siembra y la disponibilidad hídrica. *In*: Reunión Argentina de Fisiología Vegetal (21ª., 1996, Mendoza, AR). Actas. Mendoza, Argentina, Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 222-223.
92. Radford, P. J. 1967. Growth analysis formulae-their use and abuse. *Crop Science*. 7(3): 171-175.
93. Rich, A. M.; Renner, K. A. 2007. Row spacing and seeding rate effects on eastern black nightshade (*Solanum ptycanthum*) and soybean. *Weed Technology*. 21. pp. 124-130.
94. Salvagiotti, F. 2009. Manejo de soja de alta producción. Santa Fe, INTA. 2 p.

95. _____; Enrico, M. J; Bodrero. M.; Bacigaluppo, S. 2010. Producción de soja y uso eficiente de los recursos. INTA. Para mejorar la Producción. no. 45:151-154.
96. Sadras, V. O.; Ferreiro, M.; Gutheim, F.; Kantolic, A. 2000. Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperíodo. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, EEA INTA Balcarce/UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 29-60.
97. Satorre, M. 2003. El libro de la soja. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. 261 p.
98. Satorre, E. H.; Benech Arnold, R. L.; Slafer, G. A.; De la Fuente, E. B.; Miralles, D. J.; Otegui, M. E.; Savin, R. 2006. Producción de granos, bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 113-139.
99. Sawchik, J.; Ceretta, S. 2005. Consumo de agua por soja de distintos grupos de madurez en diferentes ambientes de producción (Calmer-Ausid-INIA). In: Jornada Técnica de Cultivos de Verano (2005, La Estanzuela, Colonia). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 41-45 (Actividades de Difusión no. 417).
100. Schou, J. B.; Jeffers, D. L.; Streeter, J. G. 1978. Effects of reflectors, black boards, or shades applied at different stages of plant development on yield of soybeans. *Crop Science*. 18(1): 29-34.
101. Shibles, R. M.; Weber, C. R. 1965. Leaf area, solar radiation interception and dry matter production by soybeans. *Crop Science*. 5(6): 575-577.
102. _____; _____. 1966. Interception of solar radiation and dry matter production by various soybean planting patterns. *Crop Science*. 6 (1): 55-59.
103. Taylor, H. M. 1980. Soybean growth and yield affected by row spacing and by seasonal water supply. *Agronomy Journal*. 72: 543-547.
104. Vilche, M. S.; Costanzo, M. 2011. Consumo hídrico del cultivo de soja (*Glicine max*, Merrill) en Zavalla, Santa Fé. (en línea). UNR. FCA. Revista Agromensajes. 31 (6): s.p. Consultado 12 mar. 2015. Disponible en <http://www.fcagr.unr.edu.ar/Extension/Agromensajes/31/2AM31.htm>
105. Walker, E. R.; Mengistu, A.; Bellaloui, N.; Koger, C. H.; Roberts, R. K.; Larson, J. A. 2010. Plant population and row-spacing effects on maturity group III soybean. *Agronomy Journal*. 102(3): 821-826.

106. Weber, C. R.; Shibles, R. M.; Byth, D. E. 1966. Effect of plant population and row spacing on soybean development and production. *Agronomy Journal*. 58: 99–102.
107. Wells, R. 1991. Soybean growth response to plant density; relationships among canopy photosynthesis, leaf area, and light interception. *Crop Science*. 31(3): 755-761.
108. _____. 1993. Dynamics of soybean growth in variable planting patterns. *Agronomy Journal*. 85(1): 44-48.
109. Wiatrak, P.; Dunphy, J.; Norsworthy, J. K. 2009. Planting dates and populations. (en línea). In: Wiatrak, P. ed. South Carolina soybean production guide. Clemson, SC, Clemson University Cooperative Extension Service. pp. 32-33. Consultado 12 ene. 2015. Disponible en http://Clemson.edu/extension/rowcrops/soybeans/2009_South_Carolina_Soybean_Productio_Guide.pdf