

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EFFECTO DE LA FECHA DE SIEMBRA Y DISPONIBILIDAD HÍDRICA
SOBRE EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE SOJA

por

Serena PAPARCONE PÉREZ
Francisco SILVEIRA FÚQUEZ

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

MONTEVIDEO
URUGUAY
2022

Tesis aprobada por:

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

Ing. Agr. (MSc.) Federcio Rovengo

Ing. Agr. Oswaldo Ernst

Fecha: 23 de febrero de 2022

Autores: -----
Serena Paparcone Pérez

Francisco Silveira Fúquez

AGRADECIMIENTOS

Antes que nada, agradecer a mi familia y Federico por el apoyo durante todo el trayecto de la carrera y que estuvieron ahí dándome para adelante en cada decisión que tomé. Gracias a todas esas personas que la facultad hizo encontrarme, que ahora son amigos, porque hicieron que esta carrera sea más llevadera, más linda y divertida. Gracias a mis amigas de toda la vida que a pesar de que a la mayoría las tenía lejos, las sentí cerca siempre. Por último, pero no menos importante agradecerles a Luis, Fede Rovegno y Sully por estar tan presentes en cada momento que necesitábamos y guiarnos en toda la creación de esta tesis.

Serena

En primer lugar, agradecer a la que hizo posible todo esto y que estuvo presente desde el día uno, a mi mamá, sin lugar a dudas el pilar fundamental para que esto sea posible. También agradecer a toda la familia por el apoyo brindado a lo largo de la carrera. A la barra de salto que estuvieron presente siempre en todos estos años tirando para adelante en todas. Mis amigos de Artigas que sin importar la distancia estuvieron presentes. Agradecer también a todas esas personas que estuvieron de paso en mi vida y hoy ya no están por alguna razón en particular pero que sin lugar a duda aportaron con su granito de arena. No quiero dejar de agradecer a Luis, Fede y Mónica por la dedicación y el apoyo que nos dieron sobre todo en un año muy difícil con sus características particulares de pandemia. Por último, agradecer nada más y nada menos a la que me acompañó en esta aventura, a mi amiga y compañera de tesis.

Francisco

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 DEL CULTIVO DE SOJA EN URUGUAY.....	2
2.2. ASPECTOS ECOFISIOLÓGICOS DE SOJA.....	3
2.3. RENDIMIENTO Y COMPONENTES NUMÉRICOS DEL RENDIMIENTO.....	4
2.4. POTENCIAL DE RENDIMIENTO EN SOJA.....	5
2.5. DEFICIENCIAS HÍDRICAS Y SU IMPACTO EN EL CULTIVO.....	6
2.6. CULTIVO DE SOJA SIN DEFICIENCIAS HÍDRICAS.....	7
2.6.1. <u>Importancia del agua en el cultivo de soja</u>	7
2.6.2. <u>Riego suplementario</u>	8
2.6.3. <u>Requerimientos hídricos</u>	9
2.6.4. <u>Interacción disponibilidad hídrica y fecha de siembra</u>	11
2.7. EFECTOS DE LA FECHA DE SIEMBRA, SOBRE LA BIOMASA, EL RENDIMIENTO Y COMPONENTES DEL RENDIMIENTO.....	13
2.7.1. <u>Fecha de siembra</u>	13
2.7.2. <u>Fotoperíodo, temperatura y radiación solar</u>	15
2.7.2.1. Respuesta de la interacción de la temperatura y fotoperíodo.....	15
2.7.2.2. Efecto de la temperatura en el desarrollo de soja.....	16
2.7.2.3. Efecto del fotoperíodo sobre el desarrollo de la soja.....	18
2.7.2.4. Dióxido de carbono.....	19
2.7.2.5. Radiación solar.....	19
2.7.2.6. Producción de materia seca.....	21
2.8. HIPÓTESIS.....	22

3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	23
3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO.....	23
3.1.1. <u>Manejo experimental</u>	23
3.1.2. <u>Tratamientos en evaluación</u>	24
3.2. DISEÑO ESTADÍSTICO DEL EXPERIMENTO.....	25
3.2.1. <u>Diseño experimental</u>	25
3.2.2. <u>Análisis estadístico</u>	26
3.3. DETERMINACIONES REALIZADAS.....	27
3.3.1. <u>Determinaciones durante el ciclo del cultivo</u>	27
3.3.2. <u>Determinaciones a cosecha</u>	27
3.3.3. <u>Cálculos realizados</u>	27
3.4. CONDICIONES CLIMÁTICAS EN EL PERÍODO DEL CULTIVO.....	27
3.4.1. <u>Precipitaciones</u>	27
3.4.2. <u>Radiación solar</u>	29
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	30
4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO.....	30
4.1.1. <u>Radiación solar incidente y en las etapas fenológicas de soja según fecha de siembra</u>	30
4.1.2. <u>Temperaturas mínimas, medias y máximas</u>	32
4.1.3. <u>Suma térmica de las etapas vegetativa y reproductiva según la fecha de siembra</u>	34
4.1.4. <u>Evolución del agua disponible en el suelo</u>	35
4.1.5. <u>Evapotranspiración</u>	38
4.1.5.1. Evapotranspiración del cultivo.....	38
4.1.5.2. Evapotranspiración real.....	40
4.1.6. <u>Rendimiento y componentes principales del rendimiento según fecha de siembra y disponibilidad hídrica</u>	41
4.1.7. <u>Rendimiento y componentes principales del rendimiento según la interacción entre FS y disponibilidad hídrica</u>	44
4.1.8. <u>Subcomponentes del rendimiento según fecha de siembra y disponibilidad hídrica</u>	45

4.1.9. <u>Materia seca a R4 y R6, índice de cosecha y altura de planta</u>	47
5. <u>CONCLUSIONES</u>	50
6. <u>RESUMEN</u>	51
7. <u>SUMMARY</u>	52
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	53
9. <u>ANEXOS</u>	55

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Características hidrológicas del suelo del campo experimental de riego de la EEMAC, en el cual se instaló el experimento.....	23
2. Calendario de eventos fenológicos (siembra, etapa vegetativa (VE), etapa reproductiva (R1, R4 y R6) y cosecha para las fechas de siembra (FS) de octubre, noviembre y diciembre.....	24
3. Radiación solar incidente acumulada (RS, MJ.m ⁻² .d ⁻¹) total del ciclo del cultivo, radiación solar incidente acumulada en vegetativo (Vg), R1-R3 y periodo crítico (R4-R6), en las diferentes fechas de siembra (FS): 10 octubre, 11 noviembre y 10 diciembre.....	29
4. Temperatura mínima (T mínima), temperatura media (T media), temperatura máxima (T máxima), temperatura de la serie histórica (2002-2019) y T media de la serie histórica (2000-2019) para las tres fechas de siembra en las diferentes etapas fisiológicas vegetativo, R1-R3, R4-R6, R7- R8.....	32
5. Sumas térmicas para las fechas de siembra de 10 de octubre, 11 de noviembre, 10 de diciembre), la etapas fenológicas vegetativa (VE- R1) y reproductiva (R1-R8).....	34
6. Rendimiento (kg. ha ⁻¹), número de granos (NG. m ⁻²) y peso de mil granos (PMG) según fecha de siembra y rendimiento (kg.ha ⁻¹), número de granos (NG. m ⁻²) y peso de mil granos (PMG) según disponibilidad hídrica.....	42
7. Rendimiento (kg. ha ⁻¹), número de granos (NG. m ⁻²) y peso de mil granos (PMG) según la interacción entre fecha de siembra y disponibilidad hídrica.....	44
8. Número de granos por planta (NG.pl ⁻¹), número de vainas por planta (NV.pl ⁻¹), número de granos por vaina (NG.vaina ⁻¹), número de	

aborts de vainas por planta (NAV.pl ⁻¹) y altura según fecha de siembra o disponibilidad hídrica.....	46
9. Materia seca acumulada a R4 (MS a R4 kg.ha ⁻¹), materia seca acumulada a R6 (kg.ha ⁻¹), e índice de cosecha (%IC) según fecha de siembra y materia seca acumulada a R4 (MS a R4 kg.ha ⁻¹), materia seca acumulada a R6 (kg.ha ⁻¹), e índice de cosecha (%IC) según disponibilidad hídrica.....	48
Figura No.	
1. Croquis del experimento en estudio.....	26
2. Precipitación acumulada en el periodo 2002-2019 y en el periodo 2019-2020 según mes del año.....	28
3. Radiación solar incidente (MJ.m ⁻²), ubicación temporal por décadas (dec.) y duración de las etapas fenológicas vegetativa VE-R1, R1-R3; R4-R6 y R7-R8 de soja para las fechas de siembra: 10 de octubre, 11 de noviembre y 10 de diciembre de 2019.....	30
4. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD %) para FS octubre.....	35
5. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD %) para FS noviembre.....	36
6. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD %) para FS diciembre.....	37
7. Evapotranspiración del cultivo (ETc) acumulada (mm) según etapa fenológica, para las fechas de siembra octubre, noviembre y diciembre.....	38
8. Evapotranspiración real (ETr) acumulada (mm) según etapa fenológica, para las fechas de siembra octubre, noviembre y diciembre.....	40

1. INTRODUCCIÓN

Desde comienzos del siglo XXI la agricultura en Uruguay ha evolucionado con una marcada expansión debido a un precio elevado de la soja y la creciente demanda externa de commodities. Este fenómeno fue acompañado de la adopción de tecnologías como la siembra directa y el uso de variedades genéticamente modificadas que aportaron a este aumento del área y de la producción agrícola. A pesar de ello, los rendimientos de la soja no acompañaron esta tendencia, permaneciendo estancados y con una gran variabilidad entre años. Además, existe una amplia brecha tecnológica, entre los resultados obtenidos por la investigación nacional y la producción comercial.

Según Figueredo et al. (2019), la tendencia de incremento del área sembrada duró hasta el año 2014, a partir del cual se vio una clara retracción del área agrícola pasando de 1,3 a 1,1 millón de hectáreas. Las explicaciones, de esta fase de la historia agrícola fueron principalmente una caída del precio de los commodities a nivel internacional en el 2014 hasta el 2018. Asimismo, la aplicación de la normativa del MGAP del Plan de uso y manejo de suelos que implica no se puede exceder en las rotaciones pérdidas de suelo por erosión.

La soja en el país se desarrolla en condiciones en las que la ocurrencia de precipitaciones durante el ciclo del cultivo es variable. La disponibilidad hídrica, además se ve condicionada por la capacidad de almacenaje de agua (CAAD) de los suelos agrícolas de la región que se encuentran muy por debajo de los requerimientos del cultivo durante el ciclo (Sawchik y Ceretta, 2005). Por ende, el uso de riego suplementario es la alternativa tecnológica para corregir la principal limitante ambiental, sobre todo, durante las etapas críticas del cultivo donde está en juego aproximadamente el 50% del rendimiento potencial. Por lo tanto, el riego proporciona una reducción de la variabilidad entre años y logra maximizar el rendimiento cuando no existen limitantes de otro tipo (nutritivas, radiación solar, temperatura, Agorio et al., 1988) y en conjunto a una adecuada elección de la fecha de siembra (FS) y una variedad con potencial alto de rendimiento permiten la obtención de productividades elevadas. Este trabajo tuvo como objetivo principal la cuantificación de los efectos de la FS sobre el rendimiento de soja bajo condiciones de secano y riego con la utilización de una variedad de ciclo corto y alto potencial de rendimiento.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. PRODUCCIÓN DEL CULTIVO DE SOJA EN URUGUAY

En Uruguay, el proceso de expansión agrícola que se dio a comienzos de este siglo estuvo basado principalmente en la inclusión de soja; pasando a ser el cultivo de mayor importancia económica. Este crecimiento se explica en gran medida por un contexto internacional favorable (Figueredo et al., 2019) donde los mercados emergentes provocaron un aumento en la demanda de los productos agrícolas, redefiniendo a Uruguay como un país netamente exportador de alimentos (Figueredo et al., 2019).

La soja pasó de 12.000 ha sembradas en el año 2000 a 1.334.000 ha en el año agrícola 2014-15, siendo la mayor superficie lograda hasta el presente en el país. En la zafra 2019/2020 la superficie total sembrada fue de 917.000 ha. La soja aportó el 90% del área de cultivos de verano y su producción fue estimada en 1,9 millones de toneladas, aproximadamente 29% menos que en la temporada anterior. Esta disminución en la producción se explicó fundamentalmente por la reducción en la superficie sembrada (MGAP. DIEA, 2020).

Uruguay se encuentra en una zona templada pero también presenta un clima subtropical y subhúmedo. La media en la temperatura es de 17,5 °C y la precipitación media anual es de 1300 mm. El régimen de lluvias es irregular con variaciones interanuales, acompañado de episodios de sequías e inundaciones (Aldabe et al., 2009).

La soja se realiza en mayor medida bajo condiciones de secano. En este tipo de régimen es determinante la ocurrencia de precipitaciones y según el tipo de año. Los años neutros con precipitaciones promedio, años “Niña” con precipitaciones por debajo del promedio, los rendimientos promedios son menores, y en años con buena disponibilidad de lluvias, alta RS, y temperatura son los años en que los rendimientos son más altos. Pero en general, en el verano, el contenido de agua disponible en el suelo no es suficiente para satisfacer la demanda hídrica de soja (Giménez, 2010).

Desde el 2009 a 2017, los rendimientos comerciales obtenidos variaron entre 1,2 y 2,9 Mg.ha⁻¹, mientras que los rendimientos experimentales variaron entre 3,9 y 7,2 Mg.ha⁻¹, la diferencia entre ambos es la brecha tecnológica existente, es decir, los rendimientos comerciales son aproximadamente tres veces menores que los potenciales (Giménez, 2019).

2.2. ASPECTOS ECOFISIOLÓGICOS DE SOJA

Según Farías et al. (2007), el uso de un lenguaje unificado para la descripción de los estadios de desarrollo facilita la comunicación para la descripción de la soja. Esta metodología debe tener una terminología única, ser objetiva, precisa y universal, ser capaz de describir a un único individuo o un cultivo entero y ser capaz de describir a cualquier cultivar. Esto es debido a que toma en cuenta los cambios morfológicos ocurridos en el tallo principal del 50% de las plantas del cultivo (Kantolic et al., 2003). La metodología propuesta por Fehr y Caviness (1977) es la más utilizada y presenta todas estas características.

Según Farías et al. (2007), esta clasificación identifica precisamente el estado de desarrollo en el que se encuentra una planta o un cultivo de soja. Dentro de esta escala fenológica se encuentra claramente dividido los estadios de desarrollo de la soja en vegetativos (V) y reproductivos (R). El estado de emergencia se designa con la sigla VE y fase cotiledonar (VC), las letras V y R son seguidas de índices numéricos que identifican los estados específicos de estas fases.

Farías et al. (2007), mencionan que los estadios vegetativos se determinan por el nudo del tallo donde se desarrolla la hoja porque este es permanente, mientras que la hoja al poderse desprender del tallo es temporaria. Los cotiledones son opuestos. Para determinar los estadios vegetativos (V1 a Vn), el nudo de los cotiledones no es considerado, porque no contiene hojas verdaderas. Una hoja se encuentra totalmente desarrollada si la hoja superior no se encuentra enrollada, es decir, si los bordes de los folíolos no se tocan (Kantolic et al., 2003).

Kantolic et al. (2003), plantean que en el tallo principal y en las ramificaciones, existe una expansión de hojas continuamente durante el período reproductivo, lo que por lo tanto genera una superposición de estadios vegetativos con la aparición de hojas y reproductivos con la formación de estructuras reproductivas (vainas y flores). El hábito de crecimiento y los factores ambientales afectan en gran medida el número de nudos que aparecen y se hacen visibles a partir de que se inicia el proceso de floración.

Según Neumaier et al. (2000), el crecimiento de las raíces ocurre durante toda la fase vegetativa del ciclo de la vida de una planta, cesando a partir del inicio de floración. La formación de nódulos tiene inicio normalmente en los días 7 a 10 de la emergencia de la planta (VE) volviéndose visibles desde la primera hoja trifoliada expandida (V2).

Según Farías et al. (2007), los estados reproductivos se ubican desde el período de floración hasta la maduración. El inicio de la floración de la soja es caracterizado por la apertura de una flor en cualquier nudo del tallo principal (estadio R1). A partir de esa etapa se acompaña la evolución fenológica observando las estructuras reproductivas de la soja: flores, frutos y semillas (Fehr y Caviness, 1977).

La plena floración (R2), es caracterizada por la apertura de varias flores a lo largo del tallo principal, pueden ocurrir simultáneamente; al inicio de la floración (R1), en el caso de las plantas con hábito de crecimiento determinado, o entre dos y siete días después a R1, en plantas con hábito de crecimiento indeterminado típico. En este caso no hay una transición definida entre los períodos de floración y fructificación, en general comienza dependiendo del genotipo entre 7 y 15 días después del inicio de la floración.

En la etapa R3, hay una disminución de la floración (Fehr y Caviness, 1977) y un desarrollo de la vaina hasta el estadio R4. El desarrollo y crecimiento del grano ocurre entre R5 y R6. Por último, la maduración de la planta en su inicio R7 con una vaina normal en el tallo con color maduro y la maduración plena R8 con un 95% de las vainas con coloración madura.

Kantolic et al. (2003) ubican el periodo más crítico de determinación del rendimiento entre R4-R6, esto se debe a que posibles estreses generados en esta etapa, provocan una merma en el rendimiento producto de una reducción en la capacidad de compensación por parte del cultivo, provocado por la suma de los abortos ocurridos y vainas más pequeñas, afectando el componente del rendimiento más ligado a variaciones en el rendimiento, como es el número de granos (NG) por unidad de superficie.

2.3. RENDIMIENTO Y COMPONENTES NUMÉRICOS DEL RENDIMIENTO

El rendimiento está determinado por factores genéticos que a su vez interactúan con el ambiente que, además, están asociados con el número de estructuras reproductivas por unidad de superficie y con el peso de mil granos (PMG, Daroish et al., 2005). Se ha observado que existe una correlación marcada entre el NG y el rendimiento (Martínez et al., 2001).

Los componentes numéricos del rendimiento, que se expresan por unidad de área, se van generando a medida que se desarrolla el cultivo de manera secuencial. Desde la emergencia hasta estadios reproductivos avanzados (R5), por lo tanto, mantener los parámetros limitantes del rendimiento sobre todo entre R1 y R5, es muy importante (Board y Tan, 1995).

Una consecuencia del manejo de la FS es la variabilidad de los componentes numéricos del rendimiento, dado que, lo que se estará afectando es el ambiente donde se desarrolla la planta. Por lo tanto, incidiendo sobre la duración de la etapa de fijación de los granos como también sobre el PMG de los mismos, donde a FS más tardías estos componentes se ven afectados negativamente (Martínez et al., 2001). De igual manera, Kumagai y Takahashi (2020), señalan que a medida que se atrasó la FS resultó en una disminución en el número de nudos, número de vainas (NV), PMG, y hubo una significativa reducción en el número de granos por vaina ($NG.vaina^{-1}$), traduciéndose en menores rendimientos.

Por lo tanto, al realizar un manejo de la elección de FS tempranas se está incidiendo sobre el rendimiento, dado que, permite ubicar el periodo más crítico definido entre R4-R6 en condiciones de mayor RS y mayores temperaturas (Giménez, 2007). Esta RS interceptada es particularmente importante por su relación directa con la fotosíntesis que determina en gran medida los componentes numéricos del rendimiento (Board y Harville, 1993). Además, durante dicho período se desarrollan subcomponentes del rendimiento que involucran vainas y granos por vainas, por lo que los factores ambientales pueden producir efectos directos sobre las estructuras reproductivas (Quijano, 2015).

2.4. POTENCIAL DE RENDIMIENTO EN SOJA

No solo importa para alcanzar rendimientos potenciales una oferta de recursos (agua, nutrientes, RS) en su cantidad necesaria, si no en el momento justo cuando el cultivo tenga las mayores tasas de crecimiento y se esté generando los principales componentes del rendimiento período crítico (PC, Salvagiotti, 2009). El rendimiento potencial es comúnmente mejorado cuando hay más nudos disponibles para servir como sitios para el desarrollo reproductivo, y cuando el intervalo entre los estadios de R1 a R7 son alargados (Bastidas et al., 2008).

Otegui (2009) define al rendimiento potencial como aquel que para cada especie se obtiene en un ambiente en el cual no existen estreses abióticos y bióticos. La diferencia entre rendimientos realizables y potenciales será mínima cuando se haga coincidir la combinación FS-cultivar (grupo de madurez), en los que los períodos de determinación de NG y PMG coincidan con los períodos de máxima RS incidente y temperaturas óptimas para dichos procesos (Salvagiotti, 2009).

2.5. DEFICIENCIAS HÍDRICAS Y SU IMPACTO EN EL CULTIVO

Para la mayoría de las plantas cultivadas en diferentes ambientes, alrededor del 50% de agua útil en el suelo es el límite por debajo del cual éstas comienzan a manifestar síntomas de deficiencia hídrica (Sadras y Milroy, 1996). En trabajos realizados por Andriani et al. (1991) se estudió el efecto del déficit de agua durante el período reproductivo. El trabajo se basó en tres tratamientos de deficiencia hídrica en diferentes períodos: de R1 a R4 y de R4 a R6.3. En este, se determinó que el período más sensible se daba durante R4 a R6.3 (PC), donde las pérdidas eran más importantes siendo de hasta 35% con respecto al control (mantenido constantemente a más de 50% de agua disponible).

El déficit hídrico, en general, provoca una pérdida de turgencia de las hojas, la cual genera una disminución de la tasa de crecimiento del cultivo, por lo tanto, un menor tamaño final de los órganos que se encuentran en activa expansión al momento del estrés. El crecimiento es consecuencia de la división y expansión celular. Estos dos procesos son muy sensibles a un déficit hídrico y la ocurrencia de este en las etapas vegetativas producirá un efecto marcado sobre la expansión foliar, por ende, sobre el IAF del cultivo (Dardanelli et al., 2003).

Giménez (2010), evaluó tres tratamientos de disponibilidad hídrica: bienestar hídrico (agua disponible superior al 60% en PC y 40% posteriormente); deficiencias hídricas en el PC (agua disponible inferior al 60% y posterior superior al 40%) y seco. Se obtuvieron pérdidas de 47% de materia seca (MS) cuando las deficiencias se dieron durante el PC, en relación con el tratamiento de bienestar hídrico. Giménez (2014b) explicó que estas disminuciones se dan porque la soja al final de este período ya no tiene posibilidades de compensación, ya que el PC se ubica cuando el grano se está llenando y es en R6 donde los componentes principales del rendimiento NG por superficie y PMG se encuentran prácticamente definidos.

Las deficiencias hídricas acumuladas durante las etapas vegetativas y el PC son menos graves que las deficiencias hídricas severas sólo en el PC. Esto es porque el bienestar hídrico entre VE y R3 provoca un elevado crecimiento, con alto NV y NG potenciales, generando una gran competencia por fotoasimilados entre vainas durante el PC, siendo las vainas más pequeñas abortadas en situación de deficiencias hídricas. Esto impacta de forma negativa sobre el NG y rendimiento final (Giménez, 2014b). Por otro lado, la tasa de crecimiento del cultivo fue afectada por las deficiencias hídricas desde R1 a R6.3. Desde R6.3 a madurez fisiológica hay diferencias en la tasa de crecimiento del cultivo entre los tratamientos (Andriani et al., 1991).

Andriani et al. (1991) indican que la productividad del cultivo depende del IAF para interceptar la energía solar y para que el proceso de fotosíntesis permita convertir la energía solar en MS. Al final del periodo de restricción hídrica (R1 a R3) se mostró un menor IAF, esto es porque el alargamiento celular fue reportado como el primer proceso afectado por deficiencias de agua. En el segundo periodo de restricción hídrica (R4 - R6.3), los tratamientos perdieron muchas hojas porque el déficit produjo un aceleramiento de la senescencia, como adaptación al estrés hídrico. Andriani et al. (1991), observaron una menor sensibilidad de pérdidas del rendimiento con deficiencias hídricas entre R1 a R4, esto puede ser atribuido a la plasticidad de la floración y la formación de vainas, que permitió la generación de nuevas flores y vainas con granos más pesados comparados con el tratamiento de bienestar hídrico. Por otro lado, se sugirió que existe un efecto directo del estrés hídrico durante el período de R4 a R6.3 en las estructuras reproductivas.

En el período vegetativo, la falta de riego provocó una reducción del 19% en la duración del área foliar, mientras que la tasa de asimilación neta disminuyó en un 28% y el área foliar en un 27% (Confalone et al., 1998). En presencia de déficit hídrico se reduce la expansión de hojas y la fotosíntesis, por ende, se ve limitado el crecimiento, afectando así la EUR (Sinclair y Muchow, 1999).

2.6. CULTIVO DE SOJA SIN DEFICIENCIAS HÍDRICAS

2.6.1. Importancia del agua en el cultivo de soja

Las funciones de la planta como la transpiración y la absorción de nutrientes están determinadas por el agua limitando el crecimiento de un cultivo en los sistemas agrícolas de secano (Gerster y Bacigaluppo, 2009). La importancia del agua en el cultivo se explica porque en condiciones de secano el agua disponible en el suelo determina el crecimiento y el rendimiento de los cultivos (Pietrobón et al., 2019).

La soja en el país se siembra en general bajo secano, con solo un 0,7% de la superficie total sembrada bajo riego y en estas condiciones se obtuvo un rendimiento medio 46% superior al área de secano (MGAP. DIEA, 2019). En condiciones de secano, es normal que la demanda atmosférica determine una absorción de agua que no es suficiente para compensar las pérdidas por transpiración, dando lugar a deficiencias hídricas (Salvagiotti, 2009).

La demanda atmosférica es inherente a cada ambiente y se caracteriza a través de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o). La soja, es clasificada como especie de tipo C3, el logro de altos rendimientos se ve

directamente afectado por la magnitud de las pérdidas por respiración (para mantener los tejidos y permitir el crecimiento de los órganos) y la fotorrespiración que poseen las plantas C3 (Salvagiotti, 2009). La principal fuerza motriz de la demanda es la cantidad de RS que alcanza la superficie terrestre. Los factores como el viento y la humedad del aire también lo condicionan. En condiciones de buena provisión hídrica, el consumo de agua por parte de los cultivos se encuentra fuertemente relacionado con su cobertura, representada por el IAF (Otegui, 2009).

Passioura (1996), resalta la importancia de que el cultivo pueda capturar la mayor parte del recurso agua, poder utilizarlo eficientemente al intercambiarlo a nivel estomático por el CO₂ que se destina a la producción de fotoasimilados y también convertir la mayor parte de estos asimilados en órganos de cosecha. Las plantas C3, incluso bajo condiciones ambientales favorables pierden por los estomas aproximadamente 100 moléculas de H₂O por molécula de CO₂ que entra por ellos. En zonas con aporte constante de agua, este hecho no representa un problema, pero en regiones áridas y semiáridas sí llega a serlo (Benavides, 2003). Black (1986) indica que bajo condiciones en que la disponibilidad hídrica en el suelo es óptima o la atmósfera se ve enriquecida con CO₂, las plantas C4 no muestran ventajas significativas sobre las C3 en cuanto a eficiencia de uso del agua y de conversión.

2.6.2. Riego suplementario

García Petillo (2012), plantea que una buena administración del riego es brindar la cantidad de agua necesaria antes que el contenido hídrico del suelo genere un estrés que disminuya el rendimiento, haciéndolo de una manera uniforme dentro de la parcela. A partir del riego suplementario, se permite disminuir los riesgos que contrae la agricultura en secano y se generan otros escenarios de manejo como un rango de FS posibles que se independizan del período de lluvias. Se permite así, una ubicación del PC en una época de mayor oferta de recursos como la RS. Además, también permite una disminución del riesgo del sistema productivo que se ve condicionado a variaciones de la RS y la temperatura que son variables más conservativas que el régimen de lluvias (Dardanelli et al., 2003).

La estrategia para disminuir la cantidad de agua propuesta por Capurro et al. (2017) es el riego deficitario controlado. Este se basa en riegos con 50 % de la ET_c hasta R4, y siempre cubriendo los requerimientos hídricos del cultivo durante el PC (R4 a R6). Asimismo, observaron una respuesta lineal plus-plateau del rendimiento en función del agua total efectiva. El riego aumentó el rendimiento de la soja hasta una cantidad máxima de agua total efectiva, a partir del cual no habría aumentos en el rendimiento.

En tal sentido, Prieto et al. (2012) hallaron que se puede utilizar menor cantidad de agua de riego, ya que el tratamiento con 75 % de reposición de agua deficitaria obtuvo rendimientos similares al de bienestar hídrico. Por lo tanto, es posible realizar riegos deficitarios controlados con reducciones del 25 % de la lámina de riego y consecuentemente de la ETr, sin mermas significativas en el rendimiento.

Por otro lado, Giménez (2014a) obtuvo los mayores rendimientos de soja bajo un sistema de riego que se basó en el bienestar hídrico del cultivo (40 % AD en vegetativo, 60 % AD en PC y 40 % AD de R6 a MF), específicamente en los años clasificados como “Niña” que son más secos, con elevada RS y temperaturas. Estos años poseen precipitaciones por debajo del promedio y en general mayor cantidad de luz disponible en primavera y verano.

Además, Prieto et al. (2012) observaron que en FS del 22/12 en comparación al 25/1, obtuvo mayor duración del ciclo en total y mayores ET potenciales, por lo tanto, la lámina de riego utilizada fue superior en todos los regímenes hídricos, y como consecuencia, la ETr fue significativamente superior en diciembre. Al comparar estas mismas se vio que la productividad del agua bajo riego fue mayor en ambientes con menores demandas ósea en FS tardías, pudiendo estar correlacionada con la menor ETr promedio (Prieto et al., 2012).

Por otro lado, Bastidas et al. (2008) hallaron en un ensayo en 2003 que lo mismo que se regó en un mes lluvioso (250 mm) fue aplicado en igual cantidad en los 2 meses siguientes que fueron sub normalmente calientes. También se necesitó menos cantidad de agua (161 mm) en 2004 debido a las temperaturas más bajas del año que redujo la ET durante el crecimiento reproductivo crítico en julio-agosto.

Según Canfalone et al. (2002) los tratamientos regados presentan el mejor desempeño en relación con el IAF y MS dadas las mayores tasas de crecimiento proporcionadas, atribuidas a la mejor disponibilidad hídrica ocurrida. Villalobos et al. (1991) observaron que los mayores rendimientos se obtenían con las mayores duraciones del área foliar e IAF.

2.6.3. Requerimientos hídricos

Los requerimientos de agua de la soja se encuentran bien definidos por dos períodos críticos: desde la siembra a la emergencia y durante el llenado de vainas. En el momento de la germinación, tanto el exceso como el déficit de humedad es perjudicial para la uniformidad de distribución y el número de plantas por unidad de superficie (Farías, 1995).

Exceptuando estos dos períodos críticos, la soja es considerada como tolerante a escasez de agua. Sin embargo, tanto el estrés de agua como la deficiencia de agua durante el crecimiento vegetativo puede ser muy negativo, causando plantas muy pequeñas para rendimientos altos (Peters y Johnson, 1960).

En efecto, el consumo de agua de un cultivo es el valor de la ET acumulada a lo largo de su ciclo. Para la región sojera núcleo las necesidades de agua del cultivo de soja de primera y segunda época de siembra varían de 500 a 600 mm y de 400 a 500 mm, respectivamente (Baigorri, 2003). Es así como, un cultivo de soja tardío (siembras de diciembre), necesita en promedio 454 mm para completar exitosamente su ciclo (Pietrobon et al., 2019). Mientras que para Andriani (2000) un cultivo de soja de primera consume en todo su ciclo aproximadamente 530 mm de agua.

Asimismo, las características del cultivo, la RS incidente, el período de exposición a la misma, condicionan el consumo potencial del agua de los cultivos (Giménez y García Petillo, 2011). Las limitantes al consumo de agua son el principal factor responsable de las pérdidas de rendimiento de los cultivos de secano. El consumo de agua de los cultivos cuando el contenido de agua disponible en el suelo se encuentra por encima de un umbral crítico, está determinado por una tasa de transpiración cercana a la que establece la demanda atmosférica. Cuando el contenido de agua disponible está por debajo de dicho umbral, la tasa de transpiración depende de la capacidad del cultivo para absorber el agua del suelo (Dardanelli et al., 2003).

El AD es la cual realmente puede ser extraída por el cultivo que permanece retenida entre los potenciales métricos de capacidad de campo (i.e - 22 kPa) y punto de marchitez permanente (PMP, -1500 kPa, Damiano y Taboada, 2000). En Argentina, Dardanelli et al. (2003) señalan que la cantidad de AD es de 130-140 mm por metro de perfil de suelo.

Además, el consumo de agua por el cultivo aumenta linealmente al aumentar el área foliar para una misma demanda atmosférica, hasta interceptar el 95% de la RS fotosintéticamente activa, esto es porque casi toda el agua transpirada por un cultivo pasa a través de sus hojas (Gerster y Bacigaluppo, 2009).

Por otro lado, Curto et al. (2019) establecieron un valor límite para el cual comienza el estrés hídrico de 312 mm, que se correlaciona bien con una disponibilidad de agua (0 – 1,10 m de profundidad) de 65%, con un potencial matricial medio para el perfil del suelo de - 1,4 MPa. La MS tuvo un valor de 308

kg.ha⁻¹ entre V3-V4 con una distancia entre hileras de 0,38 m y una densidad de plantas de 383000 plantas.ha⁻¹, bajo condiciones controladas de agua, sin limitaciones hídricas (Curto et al., 2019).

Los mecanismos que controlan la relación entre ET y disponibilidad de agua en soja pueden ser diversos. El más importante es el asociado a la regulación de las estomas, controlado por señales hormonales que vienen de las raíces y de la pérdida de turgencia de las hojas (Curto et al., 2019).

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

Giménez (2007) indica que el bienestar hídrico durante todo el ciclo del cultivo de soja permitió rendimientos promedio de 6,2 ton ha⁻¹. En ese sentido, cuando se controla la disponibilidad hídrica y el manejo del cultivo no presenta deficiencias, los rendimientos dependen mayoritariamente de la RS fotosintética activa interceptada, que correlaciona positivamente con la RS incidente (Cárcova et al., 2003).

2.6.4. Interacción disponibilidad hídrica y fecha de siembra

Los consumos de agua diarios más altos prácticamente coinciden con los momentos de mayor sensibilidad a deficiencias hídricas. Sabiendo esto, se puede evitar que los valores más altos de las curvas de consumo se superpongan para disminuir el riesgo de pérdidas de rendimiento y esto puede ser logrado a través de la FS y el largo del ciclo de los cultivares utilizados (Andriani, 2000).

De todas maneras, se puede determinar una FS sabiendo la cantidad de agua consumida en cada uno de los períodos de crecimiento del cultivo y así lograr que los estadios de crecimiento más críticos coincidan con los períodos durante los cuales la probabilidad de que haya agua disponible sea mayor (Farías, 1995). Por lo tanto, atrasos en la FS además de resultar en pérdidas del potencial del rendimiento, incrementan las posibilidades de encontrar problemas a la cosecha en otoños húmedos (Ceretta e Ibáñez, s.f.). En la etapa tardía de llenado de granos, debido al estrés hídrico prolongado se ha observado que el ciclo de la variedad se ha acortado en 20 días, mientras que, el estrés hídrico al comienzo de la floración suele aumentar la duración del ciclo (Baigorri, 2003).

Asimismo, en FS muy tempranas la soja en campos con excesos hídricos causa compactación del suelo y pobre implantación, esto supera el beneficio que otorgan las siembras tempranas. Se reducirá la emergencia, la población de plantas y a menudo, conducirá a un rendimiento final reducido. Las investigaciones de Iowa no apoyan la siembra antes de la última semana de abril, ya que, las condiciones del suelo en la mayoría de los casos no son adecuadas (Pedersen y De Bruin, 2009).

Por otro lado, Ceccon et al. (1994), en promedio a partir de dos FS (30/5/86 y 1/6/87) y la segunda FS (30/6/86 y 1/7/87), observaron que la biomasa total por planta se redujo más por estrés hídrico en la etapa vegetativa que en la etapa reproductiva. Además, la escasez de agua redujo mucho más la acumulación de MS en las ramas laterales que en el tallo principal, sobre todo para fechas de siembra más tardías como finales de junio.

Seibane (2005) no encontró diferencias significativas entre FS x disponibilidad hídrica (riego o secano) en un ensayo con seis cultivares de soja de distintos GM (II al V) y tres FS (23/10, 27/11 y 14/01) con dos niveles de deficiencias hídricas: riego y secano, en Villa Mercedes (San Luis). Asimismo, Prieto et al. (2012) no encontraron una interacción entre la FS y el régimen hídrico aplicado los cuales eran 5 tratamientos de riego con la reposición del 100, 75, 50, 25 y 0% de la del cultivo. Por otro lado, Manlla y Salvagiotti (2011) en Santa Fe, Argentina encontraron una ligera significancia de la interacción FS x riego, debido a que solo para la FS del 8/1/2010 el riego tuvo efecto sobre el rendimiento, debido a que en las FS de 26/10/2009 y 24/11/2009 la magnitud de las precipitaciones fue suficiente para no afectar el crecimiento y rendimiento del cultivo.

No obstante, Vicente (2019) observó que la FS condicionó a diferencias en las precipitaciones acumuladas debido a no sólo la distribución de las precipitaciones, sino también, al mencionado acortamiento del ciclo total del cultivo. Para la FS del 4 de octubre se acumularon 600 mm durante el ciclo, valor que se fue reduciendo al atrasar la siembra, pero solo en la FS del 16 de enero, que no alcanzó a recibir 250 mm, observando un impacto de importancia en los rendimientos. Aunque, Ponsa (2019) arrojó resultados en la soja que fue sembrada temprano (15/11/2017) resultó en rendimientos más elevados que la tardía (21/12/2017), que se debería, en parte, a la disponibilidad hídrica diferencial durante el PC crítico de determinación de rendimiento.

2.7. EFECTOS DE LA FECHA DE SIEMBRA, SOBRE LA BIOMASA, EL RENDIMIENTO Y COMPONENTES DEL RENDIMIENTO

2.7.1. Fecha de siembra

La elección de la FS es un factor importante debido a que está asociada en gran medida a la generación de los componentes del rendimiento, sobre todo a las NV por m⁻² (Robinson et al., 2009). Según el GM que pertenezca la variedad y la FS utilizada será la respuesta que se obtenga (crecimiento y desarrollo), ya que, responden de forma diferencial al fotoperíodo (alargamiento de los días en la primera etapa del cultivo). Las variedades que mejor se adaptan a FS tempranas son las pertenecientes al GM IV (Manlla y Salvagiotti, 2011).

Según lo reportado por Bastidas et al. (2008) en siete de las ocho FS evaluadas, encontraron que la diferencia entre V1 y R1 era casi constante entre los 28 y 31 días, esto refleja que R1 depende de cuando ocurra V1. Asimismo, Wilkerson et al. (1989) reportaron que R1 rutinariamente ocurría 20 días después de V1, pero con una temperatura constante de 26 °C y un fotoperíodo fuertemente inductivo. Esta diferencia en los días refleja la menor fuerza inductiva natural del fotoperíodo y las temperaturas más frías del primer ensayo mencionado.

Batidas et al. (2008) reportaron que adelantar en la FS desde mediados de junio a principios de mayo o fines de abril, alarga los días desde la emergencia y germinación a V1 dado por su sensibilidad a la temperatura. Por otro lado, también V1 se adelanta en fecha calendario cuando se compara con FS más tardías, por lo tanto, lleva a un comienzo temprano del nudo apical y a la inducción floral.

La FS es el factor más importante en determinar el comportamiento fenológico. En la medida que esta se atrasa, los ciclos en los diferentes GM se acortan tanto en el período vegetativo como reproductivo. Pero las variedades que más se afectan son las que pertenecen a los GM largos (Giménez, 2007). Daroish et al. (2005), indican que las FS tienen un efecto significativo en el rendimiento en grano y rendimientos biológicos. Los máximos rendimientos en grano (437 g.m⁻²) y de MS total (1393 g.m⁻²) fueron obtenidos con FS tempranas, y estos disminuyen con FS tardías.

Bastidas et al. (2008) encontraron una disminución lineal del rendimiento por cada día de atraso en la FS, que fue baja en 2003 (17 kg ha⁻¹.d⁻¹), pero alta en 2005 (43 kg ha⁻¹.d⁻¹). En comparación, el total de reducción de rendimiento por haber atrasado 45 días desde el 1 de mayo al 15 de junio fue de 745 kg. ha⁻¹ en el 2003 (primavera fría, pero verano caliente), pero más sustantivo en el 2004

con 1950 kg. ha⁻¹ (primavera caliente, pero verano frío). Esto demuestra la importancia de sembrar temprano para maximizar el potencial de la soja irrigada.

Por otra parte, también se constató un IAF de 6,13 que fue el máximo logrado en FS tempranas. El IAF decreció significativamente a medida que se atrasó la FS, dado que la mayor parte del desarrollo del IAF durante el período reproductivo temprano ocurre en las ramas, con una consecuente mayor partición de la MS total en las ramas, en un cultivo sembrado temprano puede resultar en un IAF máximo a R5 (Daroish et al., 2005).

La tasa de crecimiento de los cultivos y la asimilación neta durante el llenado de granos es muy influenciada por las FS. Las máximas tasa de crecimiento (5,21 g. m⁻²) y asimilación neta (5,91 g. m⁻²) se obtuvieron con FS tempranas. En el caso de atrasos en la FS se constató la disminución de la tasa de crecimiento en 61% (Daroish et al., 2005).

Bastidas et al. (2008) sugieren que las FS tempranas contribuyen a ganancias en rendimiento. En este caso, las FS tempranas de mayo son recomendadas para alcanzar máximos rendimientos, donde se ha observado reducciones importantes en el rendimiento por el atraso de la siembra a meses más cálidos como junio, estas fechas se definen por las bajas temperaturas anteriores a las óptimas recomendadas. Los rendimientos alcanzados son de 3,49 toneladas por hectárea (USDA. NASS, 2020). A pesar de las temperaturas más frías y el lento crecimiento durante la germinación, hay un beneficio en rendimiento al sembrar en FS tempranas que parecen ser influenciadas por el rendimiento potencial (Pederson, 2008).

Asimismo, la ubicación temporal del PC, Giménez (2007) señala que las FS de octubre presentaron el PC antes que las FS de noviembre y diciembre, además la duración del PC fue en general mayor en las FS tempranas, concordando con Gaso et al. (2015) los cuales afirman que en FS de octubre la duración del PC es mayor que en FS de noviembre y que independientemente del GM, esto permite una mayor acumulación de biomasa determinando así un mayor número de estructuras reproductivas.

Además, las FS tempranas presentaron una parte significativa del PC durante el mes de enero donde ocurren las mayores demandas evaporativas atmosféricas, por ende, mayores ETc (Giménez, 2007). Se puede observar una relación directa entre los rendimientos alcanzados y las ETc acumuladas del ciclo en las diferentes FS. Cuanto mayor la ETc acumulada del ciclo mayor es el rendimiento (Canosa y Prieto 2013, Giménez 2014b).

La elección de la FS da la posibilidad de ubicar el PC en el ambiente más favorable para la fotosíntesis. Durante esta etapa del cultivo se encuentra más sensible, y condiciona la TCC la cual determina el $\text{NG} \cdot \text{m}^{-2}$, componente principal del rendimiento (Egli, 1988). Asimismo, De Bruin y Pedersen (2008) concuerdan que el componente que provocó respuestas en el rendimiento entre FS fue el $\text{NG} \cdot \text{m}^{-2}$, existiendo una correlación lineal fuerte ($R^2=0.89$) entre $\text{NG} \cdot \text{m}^{-2}$ y rendimiento, pero no entre PMG promedio y el rendimiento. Por otro lado, Bastidas et al. (2008) hallaron que el PMG fue mayor en $0,007 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ cuando las FS fueron atrasadas desde principios de mayo a fines de mayo en el 2003. En 2004, el PMG aumentó en $0,009 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ pero solo durante las tres últimas FS y la FS de abril aumentó en $1,4 \text{ g}$.

Bastidas et al. (2008) constataron una disminución lineal en el rendimiento al retrasar la FS. Esto destaca la importancia de las FS tempranas para maximizar el rendimiento potencial de la producción de soja irrigada. Concordando con lo reportado por Martínez et al. (2001) los cuales concluyeron que el índice de cosecha (IC) disminuye a medida que se atrasa la FS. Por otro lado, Prieto et al. (2012) constataron que ante atrasos de FS del 22/12 al 25/1 ocurrió un aumento en el IC por una mayor proporción de biomasa en el grano con respecto de la biomasa total no logra remediar la caída en el NG.

Las FS tempranas resultan en: aumentar la fotosíntesis, aumentar el número de nudos del tallo principal (más flores, vainas y granos), mayor tasa de crecimiento durante la fijación de vainas, potencial de floración temprana, período reproductivo más largo y mayor tasa de llenado de granos (Pederson, 2008).

2.7.2. Fotoperíodo, temperatura y radiación solar

2.7.2.1. Respuesta de la interacción de la temperatura y fotoperíodo

La soja además de ser exigente en términos de temperatura y agua también se define como fotoperiódica, por tener cierta sensibilidad al acortamiento de los días, donde cada cultivar posee un valor crítico para que la floración suceda (Farías et al., 2007). La duración de las fases de desarrollo del cultivo se ven reguladas por la temperatura y el fotoperíodo son los factores ambientales, actuando en forma simultánea en las plantas y con evidencia de interacción entre ellos (Toledo, 2018).

Cooper (2003) constató una fuerte interacción entre fotoperíodo y temperaturas de la primavera temprana o sea un efecto fototérmico. Este sostuvo que una iniciación temprana al período reproductivo, provocado por temperaturas calientes en primavera, cuando las intensidades de luz (ángulo del sol) es el máximo y los días son los más largos (mayor RS total disponible), se puede lograr

rendimientos de 6000-7000 kg.ha⁻¹ cuando otros factores limitantes son minimizados.

2.7.2.2. Efecto de la temperatura en el desarrollo de soja

La temperatura regula el desarrollo a lo largo de todo el ciclo. La duración de una fase (habitualmente medida en días) depende de la temperatura, siendo esta determinante en la longitud de cada una de las etapas (Toledo, 2018). A mayor temperatura, menor es la duración de las etapas, por otro lado, mayor es la tasa de crecimiento (Salvagiotti, 2009).

Asimismo, los requerimientos térmicos y las temperaturas cardinales (temperaturas base, óptima, máxima y mínima) que regulan la tasa de desarrollo difieren a lo largo de las fases de desarrollo, sobre todo en la fase vegetativa (Kantolic et al., 2003). La temperatura base de desarrollo varía entre 6 y 10°C; la temperatura óptima diurna para fotosíntesis está comprendida entre 30 y 35°C (Kantolic, 2008). En etapas vegetativas, temperaturas mayores a 20 °C son consideradas óptimas para favorecer la germinación de las semillas, crecimiento de nudos y el desarrollo de área foliar (Salvagiotti, 2009). La temperatura óptima nocturna para el crecimiento se encuentra entre 21 y 27°C (Toledo, 2018). Durante las etapas reproductivas, temperaturas de 26 °C son óptimas para el desarrollo de vainas y 24 °C para el desarrollo de los granos (Salvagiotti, 2009). La fijación de vainas se retrasa con temperaturas menores a 22 °C y cesa con temperaturas menores a 14 °C.

Según Farías et al. (2007), la soja se adapta mejor a zonas con temperaturas entre 20 - 30 °C, mientras que temperaturas inferiores o iguales a 10 °C y por encima de 40 °C no son recomendables, ya que, las mismas tienen un efecto adverso sobre la tasa de crecimiento, provocando daños en floración y disminuyendo la capacidad de retención de vainas. En tanto, Lindsey y Thomson (2012) informaron que la temperatura óptima de la soja varía de 25 °C a 29 °C y que la sobrevivencia de las vainas se ve gravemente afectada por encima de los 37 °C.

Los requerimientos de sumas térmicas de siembra a emergencia son 105°C días y 125°C días si se considera temperatura de suelo y aire respectivamente (Toledo, 2018). A partir de modelos de relación con la temperatura media del aire (acumulación en GD) es posible estimar la producción de MS, por lo que, a mayor acumulación en GD, mayor es la MS acumulada (Canfalone et al., 2002).

En cuanto a los NG.planta⁻¹ ocurre algo similar, ya que, también aumenta con un incremento de la temperatura en rangos de 18°/12°- 26°/20° (Baker et al., 1989). Para el caso del PMG, aumenta en relación con la temperatura, pero por encima de los 26°/20° el peso de la mismo disminuye (Baker et al., 1989). También se vio que temperaturas durante la floración y el desarrollo de las vainas que se encontrasen por encima de los 33°/28° provocaron disminuciones en el PMG por una reducción en la tasa de llenado del grano, independientemente de la temperatura durante el llenado del grano (Egli y Wardl, 1980). La temperatura, en conjunto con el fotoperíodo también pueden modificar la duración de la etapa de llenado de granos, pero compensando por una tasa que puede resultar en que el PMG final no varíe (Kantolic et al., 2003). El NG. vaina⁻¹ es el último componente afectado por la temperatura (Baker et al., 1989).

Por otro lado, Cooper (2003) observó que las temperaturas normales (15.5 - 16°C) de mayo en el hemisferio Norte resultan en floraciones tardías que limitan los rendimientos de la soja en 4500-5500 kg.ha⁻¹ en cultivares determinados. Mientras que temperaturas calientes de mayo adelantan la floración, brindando ventajas (mayor intensidad de la luz y días más largos en junio, periodo reproductivo más largo) el potencial de rendimiento de la soja puede ser superior a los 6000 hasta 7000 kg. ha⁻¹ controlado otros factores limitantes.

Asimismo, Hatfield y Prueger (2015) vieron efectos con altas temperaturas mínimas (3°C por encima del normal) aumentan la tasa de senescencia y disminuye la habilidad de la eficiencia de producir grano. Por otro lado, los mismos autores concluyeron que la exposición a altas temperaturas durante el llenado de granos incluye temperaturas que son más calientes en la noche entonces, el efecto de aumentar temperaturas mínimas durante el periodo reproductivo produjo impactos negativos en el rendimiento. Los efectos de las temperaturas interaccionan con la disponibilidad de agua en el suelo que sugieren una variación en las precipitaciones en conjunto con temperaturas calientes pueden aumentar los efectos negativos en la producción de grano.

Asimismo, sembrar antes que la última semana de abril en Iowa puede aumentar la probabilidad de tener que resembrar chacras que pueden estar severamente dañadas por la helada y temperaturas frías letales. Lo anterior se explica debido a que puede aumentar la probabilidad de daño por imbibición y la exposición a heladas tardías. De todos modos, si se toman todas las recomendaciones las chances de daño por imbibición y exposición a heladas tardías puede ser minimizado (Pedersen y De Bruin, 2009).

En estudios recientes en dos regiones de EEUU, registraron cambios en el rendimiento cuando se sometía el cultivo a aumentos de temperatura de 0,8°C

por encima de la media de cada región (medio Oeste 22,5°C y Sur 26,7°C), los cuales fueron de +1,7% y -2,4% respectivamente, sin embargo, cuando el cultivo sufría incrementos de concentraciones de CO₂ de 380 a 440 $\mu\text{mol. mol}^{-1}$ ambas zonas tenían aumentos de +7,4% en sus rendimientos. Mientras que, cuando se estudiaban ambos parámetros juntos (temperatura y CO₂) los incrementos en el rendimiento fueron de 9,1% para el medio Oeste y 5% para la zona Sur, cabe aclarar que este ensayo se llevó a cabo bajo el supuesto de que haya disponibilidad hídrica en el suelo (Hatfield et al., 2011).

2.7.2.3. Efecto del fotoperíodo sobre el desarrollo de la soja

La soja se caracteriza por ser un cultivo de ciclo anual, fotosensible al acortamiento de los días con respuesta cuantitativa, esto hace que tenga un fotoperíodo umbral que por encima del mismo la inducción floral se retrasa, como así también sucede con la formación de vainas, ya que el tiempo que transcurre entre estos dos eventos también aumenta (Criswell y Hume, 1972).

Sin embargo, este fotoperíodo crítico depende del genotipo utilizado, existen variedades que son muy sensibles al fotoperíodo y otros que responden en menor medida, pero ambos grupos retrasan su floración cuando el fotoperíodo se extiende. Por otra parte, también hay variedades que se muestran insensibles al alargamiento de los días y responden en mayor medida a los cambios de temperatura en el ambiente, estos son los GM clasificados como cortos (Hadley et al., 1984).

El mecanismo receptor de las señales lumínicas a lo largo del día que regulan el desarrollo de la planta son las hojas, donde las primeras evidencias de los botones florales aparecen en las axilas de las primeras hojas del tallo principal. Por lo tanto, un factor que incide en este mecanismo es el grado de desarrollo de las hojas, las cuales se vuelven menos activas a medida que son más viejas (Borthwick y Parker, 1938).

Según los resultados de Cámara et al. (1997), la duración del periodo vegetativo se hace más largo en el tiempo cuando la duración del día es de 13-14 horas, con un promedio de 28-48 % de incremento en días, a diferencia del día corto 12 hs, dando como resultado que las plantas sean más altas y tengan un mayor número de nudos incidiendo sobre el rendimiento. Kantolic y Slafer (2001) encontraron que el GM IV tuvo un 43% de aumento en la duración del PC (R3 - R6) al extender el fotoperíodo en 2 horas después de R3. El alargamiento del PC no fue significativo en FS tardías por las menores temperaturas durante este período (18,5 vs. 23 °C) y menor fotoperíodo (12,2 hs vs. 13,9 hs). La exposición a fotoperíodos largos promovió la producción de nudos por planta.

Por otro lado, Prieto et al. (2012) a causa de un atraso en la FS, pasando del 22/12 al 25/1, observaron que el ciclo disminuyó un 20% debido al acortamiento del fotoperíodo. Esta disminución se dio por la reducción del período vegetativo (período siembra-R1, comienzo de floración) y el período de fijación de vainas (R1, comienzo de floración - R5, comienzo de llenado de granos).

2.7.2.4. Dióxido de carbono

En condiciones de rendimiento potencial de una especie (ausencia de estreses abióticos y bióticos), el rendimiento dependerá de la capacidad de fijar carbono a través de la fotosíntesis, la cual estará regulada por la cantidad de RS que el cultivo sea capaz de interceptar, con el supuesto de que el CO₂ es un recurso de oferta constante por parte de la atmósfera y no está sujeto a modificaciones significativas en el corto plazo (Otegui, 2009).

El aumento de CO₂ contribuye significativamente a favorecer el crecimiento de las plantas y mejorar la eficiencia de uso de agua, sin embargo, existe una disminución de estos efectos positivos por las mayores temperaturas que experimentan las plantas en el ciclo (Hatfield et al., 2011). El supuesto subyacente es que el rendimiento aumentará en la misma medida que el CO₂ causando una reducción en la evapotranspiración (Hatfield et al., 2011).

Por otro lado, Vu et al. (1997), observaron que la tasa de asimilación de CO₂ fotosintética de la hoja cuando era sustancialmente favorecida por elevar el CO₂ y esto se dio hasta 2-3 meses después de crecimiento bajo alta concentración de CO₂. Se registró un aumento lineal de la fotosíntesis al aumentar el CO₂ con aumento de la temperatura, este incremento fue de 32% a los 28° hasta 95% a los 40°C.

2.7.2.5. Radiación solar

Dada una adecuada disponibilidad de agua, nutrientes y temperaturas, la capacidad de acumular biomasa será función de la interceptación de RS durante los períodos de máxima heliofanía (Melgar et al., 2011). La RS fotosintéticamente activa interceptada por los cultivos es transformada en biomasa, de forma que la pendiente de la relación lineal entre ambas variables representa la EUR (Sinclair y Muchow, 1999).

Las temperaturas regulan la duración de cada periodo (mayor temperatura, menor duración) y las tasas de crecimiento (mayor temperatura, mayor tasa). En ausencia de limitantes en la disponibilidad de agua y nutrientes, el cultivo de soja debe desarrollar un canopeo que permita maximizar la

intercepción de RS durante la etapa reproductiva temprana (Salvagiotti, 2009). De esta manera, la oferta de RS y temperaturas según la etapa fenológica se jugará de manera fundamental en definir el máximo crecimiento y rendimiento potencial (Salvagiotti, 2009).

Asimismo, Giménez (2017) constató que con RS incidentes elevadas se obtuvieron mayores producciones de biomasa, a pesar de que la soja es una especie del tipo fotosintético C3. En un tratamiento sin deficiencias hídricas en el 2011 produjo 14 t. ha⁻¹ de biomasa aérea total mientras que el mismo en el 2012 se lograron 13,7 t. ha⁻¹, siendo mayor la RS incidente total en el 2011, pero esta diferencia no fue significativa.

Según Foster y Rovegno (2015), en un experimento sin limitante hídricas cuando la RS promedio durante todo el ciclo y el PC estuvo por encima de los 20 MJ.m⁻².día⁻¹ obtuvieron rendimientos mayores a 6000 kg.ha⁻¹, sin embargo, cuando la RS se ubicó por debajo de este valor no se superaron los 5000 kg.ha⁻¹ de rendimiento. Algo similar sucedió con el NG por m⁻², por encima de 20 MJ m⁻².día⁻¹ promedio para el ciclo se lograron más de 3000 granos m⁻².

En comparación con otras especies C3, la soja alcanza valores de EUR bajos, por el alto contenido energético de los granos y los elevados requerimientos de nitrógeno de las hojas (Sinclair y Muchow, 1999). Estos mismos autores, reportaron valores máximos de 1,02 g. MJ⁻¹. Asimismo, Filippi (2019), alcanzó valores promedio para EURb de 1,28 g. MJ⁻¹ para un año donde se presentaron abundantes precipitaciones, valores que se asimilan a resultados de Canfalone et al. (2002) de 1,38 g. MJ⁻¹ en un tratamiento bajo riego en Buenos Aires.

La RS interceptada determina la producción de MS y la tasa de crecimiento. Este último determina la producción de MS propiamente dicha (Kantolic et al., 2003). La energía utilizada por el cultivo es la propia RS interceptada, que es resultado de la eficiencia con que la RS incidente es interceptada por el canopeo (Kantolic et al., 2003). Dicho esto, se ve como de gran importancia producir hojas que intercepten la mayor cantidad de RS en el manejo de cultivos de alta producción.

En ensayos llevadas a cabo por Foster y Rovegno (2015) en Paysandú, concluyeron de que variaciones en la RS por más que exista bienestar hídrico durante el ciclo de la soja, no asegura la concreción del potencial de rendimiento; dichos tratamientos presentaron una reducción de 1600 a 2600 kg.ha⁻¹ comparado con los rendimientos en ensayos anteriores en la misma zona.

2.7.2.6. Producción de materia seca

La parte aérea de la planta de soja consta de un tallo principal de altura variable con un número de nudos que varían entre 14 y 20 o más, cuando se la siembra en época, latitud y densidad adecuada para cada cultivar. Si bien todos los nudos tienen la capacidad de producir ramificaciones, el número de estas es inferior al número de nudos del tallo principal (Bodrero, 2003).

Según Baigorri (2003), el crecimiento que presentan las plantas de soja sigue las características de una distribución normal, donde acumula biomasa hasta cierto punto y luego comienza a decrecer, esta singularidad está sujeta a la FS. Cortés (2015) reporta que cuando se atrasa la FS se expone al cultivo a un fotoperíodo más corto, resultando en una menor producción de biomasa total y además altura de plantas, menor ramificaciones, número de nudos y vainas por planta menores y por ende menores rendimientos. Por lo tanto, FS luego de mediados de noviembre al haber una menor RS interceptada total produce menores rendimientos, explicado en parte por la menor duración de las etapas vegetativas y reproductivas.

En las etapas R1 a R5, en variedades GM III y IV indeterminadas mostraron una relación directa entre la tasa de crecimiento y el rendimiento del cultivo en esta etapa (Baigorri, 2003). La tasa de crecimiento reportada por Foster y Rovegno (2015) entre las fases de R4 y R6 fue de $94 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$.

Bastidas et al. (2008) mostraron que, por cada día de atraso de la FS, el número de nudos por planta disminuyó, en este mismo estudio se observó que al adelantar siete semanas la FS desde mediados de junio (para el hemisferio Norte) la altura de planta logra aumentar hasta 19 cm, por lo tanto, en principio las FS tempranas permitirán mayor número de nudos por planta. En investigaciones con resultados similares, Ibrahim (2012) en FS posteriores a finales de junio, debido a la floración temprana, las plantas son más cortas y con menor crecimiento vegetativo, resultando en un menor número de vainas por planta, granos más pequeños y como resultado final rendimientos más bajos.

Según Toledo (2018) se alcanzan las máximas alturas a cosecha en la mayoría de las variedades para gran parte de los ambientes de la región productiva de argentina y dichas alturas varían según la FS. Las mayores alturas alcanzadas se registraron entre mediados de octubre y noviembre. Además, encontrándose en grupos de madurez cortos y largos mayor brecha en altura en FS tempranas de octubre, y esta diferencia disminuyó a medida que la siembra se atrasó.

Giménez (2014a) reporta una acumulación de MS máxima cuando las condiciones fueron sin limitantes hídricas, en la etapa a R6 en un año llegó a los 8347 kg.ha⁻¹ mientras que para otro alcanzó 16168 kg.ha⁻¹ y adjudicó las diferencias en MS a la RS incidente, la cual varió según la cantidad de precipitaciones. Según lo reportado por Baigorri (2003) cuando la disponibilidad hídrica no es limitante, el rendimiento depende de la cantidad de biomasa vegetal producida y el índice de cosecha (IC) del cultivar. De igual manera Egli y Wardlaw (1980), Vega et al. (2001).

2.8. HIPÓTESIS

Las FS de noviembre son las que provocan los mejores rendimientos en soja en comparación a FS tempranas de octubre o tardías de diciembre, en condiciones de riego y en secano.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

El experimento se llevó a cabo en el campo experimental de riego de Facultad de Agronomía. EEMAC (Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni”), ubicada sobre la Ruta 3, km 363, en el Departamento de Paysandú, Uruguay (32°22' S 58 ° 03' O), durante el año agrícola 2019/20. El suelo del campo experimental de riego de la EEMAC es clasificado como Brunosol sub - éútrico típico perteneciente a la unidad San Manuel, incluida dentro de la formación Fray Bentos, según la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay a escala 1:1000000 (Durán et al., 1976).

Cuadro 1. Características hidrológicas del suelo del campo experimental de riego de la EEMAC, en el cual se instaló el experimento

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

Dap: densidad aparente. CC= capacidad de campo. PMP= punto de marchitez permanente. CAAD= capacidad de almacenaje de agua disponible.

3.1.1. Manejo experimental

El ensayo a campo se inició el día 10 de octubre con la primera FS, seguida del 11 de noviembre y 10 de diciembre, todas fueron sembradas con la variedad DM 50i17 del GM V corto con hábito de crecimiento indeterminado. La población objetivo fue de 350.000 pl.ha⁻¹, utilizándose una distancia entre hileras de 0,40 m y realizando un ajuste de población de plantas en V2 logrando de esa manera la población objetivo.

El cultivo se mantuvo libre de malezas, enfermedades y plagas. Para ello se realizaron tres aplicaciones de glifosato a razón de 2 lt.ha⁻¹ de producto comercial para controlar malezas, una aplicación de insecticida Engéo a razón de 0,2 lt ha⁻¹ de producto comercial para el control de chinches (*Nezara viridula*).

Cuadro 2. Calendario de eventos fenológicos (siembra, etapa vegetativa (VE), etapa reproductiva (R1, R4 y R6) y cosecha para las fechas de siembra (FS) de octubre, noviembre y diciembre

	FS octubre	FS noviembre	FS diciembre
Siembra	10/10/2019	11/11/2019	10/12/2019
VE	12/10/2019	14/11/2019	14/12/2019
R1	27/11/2019	2/1/2020	24/1/2020
R4	9/1/2020	4/2/2020	18/2/2020
R6	5/2/2020	26/2/2020	10/3/2020
Cosecha	17/3/2020	27/3/2020	14/4/2020

En el Cuadro 2, se muestran las fechas en que se desarrollan los diferentes estadios fenológicos entre siembra y cosecha: siembra (VE, R1, R4, R6, Fehr y Caviness, 1997) y cosecha para las tres fechas de siembra en estudio (10 de octubre, 11 noviembre y 10 de diciembre).

3.1.2. Tratamientos

- 1) Fecha de siembra: 10 de octubre con riego
- 2) Fecha de siembra: 10 de octubre sin riego
- 3) Fecha de siembra: 11 de noviembre con riego
- 4) Fecha de siembra: 11 de noviembre sin riego
- 5) Fecha de siembra: 10 de diciembre con riego
- 6) Fecha de siembra: 10 de diciembre sin riego

El ensayo constó de 24 unidades experimentales dado que cada tratamiento tuvo cuatro repeticiones. La unidad experimental (parcela) estuvo constituida por 5 hileras de plantas, de 5 m de longitud y 2 m de ancho.

Los tratamientos bajo riego se mantuvieron con el porcentaje de agua disponible (AD) por encima de 40% en las etapas no críticas del cultivo (ENC) y se mantuvo por encima de 60% AD durante el PC, dicho método mantiene el bienestar hídrico en el cultivo (Della Maggiora et al., 1998). El sistema de riego utilizado fue por goteo, para ello cada hilera presentó emisores separados cada 0,3 m y un caudal nominal de cada gotero de 1,49 l.h⁻¹. El ajuste de la lámina de riego se basó en un balance hídrico de suelos simplificado de paso diario que intervino en la medida que se llegara a los umbrales de riego indicados. El balance hídrico se realizó en base al crecimiento radicular estimado para el cultivo de soja y se calculó según la siguiente fórmula:

variación del agua en el suelo $\Delta H = R + PP - ET_c$

Donde ΔH corresponde a la variación de contenido de agua en el suelo (mm), R a riego (mm), PP a precipitaciones ocurridas (mm) y siendo la evapotranspiración del cultivo (ET_c) se calculó a partir de la evapotranspiración de referencia (ET_o) de Penman - Monteith y el coeficiente de cultivo (K_c). La ET_o se calculó en base a la ecuación de FAO Penman-Monteith y se usaron los K_c recomendados por FAO (Allen et al., 2006) para las diferentes etapas del cultivo.

3.2. DISEÑO ESTADÍSTICO DEL EXPERIMENTO

3.2.1. Diseño experimental

En el experimento, se utilizó un diseño de parcelas divididas, hay una parcela mayor y una menor. La parcela mayor es la FS y la menor es la disponibilidad hídrica (riego o seco), que está sorteada dentro de la mayor. Este diseño tiene dos fuentes de variación: tratamientos y repeticiones. Los tratamientos fueron asignados al azar a las unidades experimentales dentro de cada bloque.

Ensayo de soja FS					
FS 2 S	FS 2 R	FS 3 S	FS 3 R	FS 1 R	FS 1 S
P19	P20	P21	P22	P23	P24
FS 1 R	FS 1 S	FS 2 S	FS 2 R	FS 3 S	FS 3 R
P13	P14	P15	P16	P17	P18
FS 3 S	FS 2 R	FS 2 S	FS 1 S	FS 1 R	FS 3 R
P7	P8	P9	P10	P11	P12
FS 2 R	FS 2 S	FS 1 R	FS 1 S	FS 3 R	FS 3 S
P1	P2	P3	P4	P5	P6

Fecha de siembra octubre regado (FS 1 R), fecha de siembra octubre seco (FS 1 S), fecha de siembra noviembre regado (FS 2 R), fecha de siembra noviembre seco (FS 2 S), fecha de siembra diciembre regado (FS 3 R), fecha de siembra diciembre seco (FS 3 S).

Figura 1. Croquis del experimento en estudio

3.2.2. Análisis estadístico

El análisis del experimento fue realizado a través del programa “INFOSTAT” en su versión estudiantil. Se estudió el análisis de varianza, mediante el cual se descompone la variación total en tantos componentes como tenga el modelo. La significancia de contrastes simples se estudió a través del test de Tukey al 0,05.

3.3. DETERMINACIONES REALIZADAS

3.3.1. Determinaciones durante el ciclo del cultivo

En el transcurso del ciclo del cultivo se realizaron muestreos de MS en los estadios R1, R4 y R6 a partir de 2 m lineales de planta, para cada tratamiento, donde se obtuvo información como peso húmedo, peso seco, tamaño de vainas (para R4) y NG.vaina⁻¹ (para R6). Para la obtención de peso seco, las muestras fueron colocadas en estufa a una temperatura de 60°C hasta que mantuvieran el peso constante. El objetivo de las mediciones fue evaluar la acumulación de MS, la tasa de crecimiento del cultivo promedio durante el PC y el crecimiento y desarrollo de las vainas.

3.3.2. Determinaciones a cosecha

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

3.3.3. Cálculos realizados

Para determinar el número de granos.m⁻² se realizó una estimación mediante el siguiente cálculo:

$$\text{NG.m}^{-2} = \text{Rendimiento (kg. ha}^{-1}\text{)} / \text{PMG}$$

Para la determinación de la suma térmica (GD) se realizó la sumatoria de los grados días con temperatura base 10°C, acumulados durante las diferentes etapas fenológicas del cultivo (VE, R1-R3, R4-R6, R7-R8), para cada FS (10 de octubre, 11 de noviembre y 10 de diciembre).

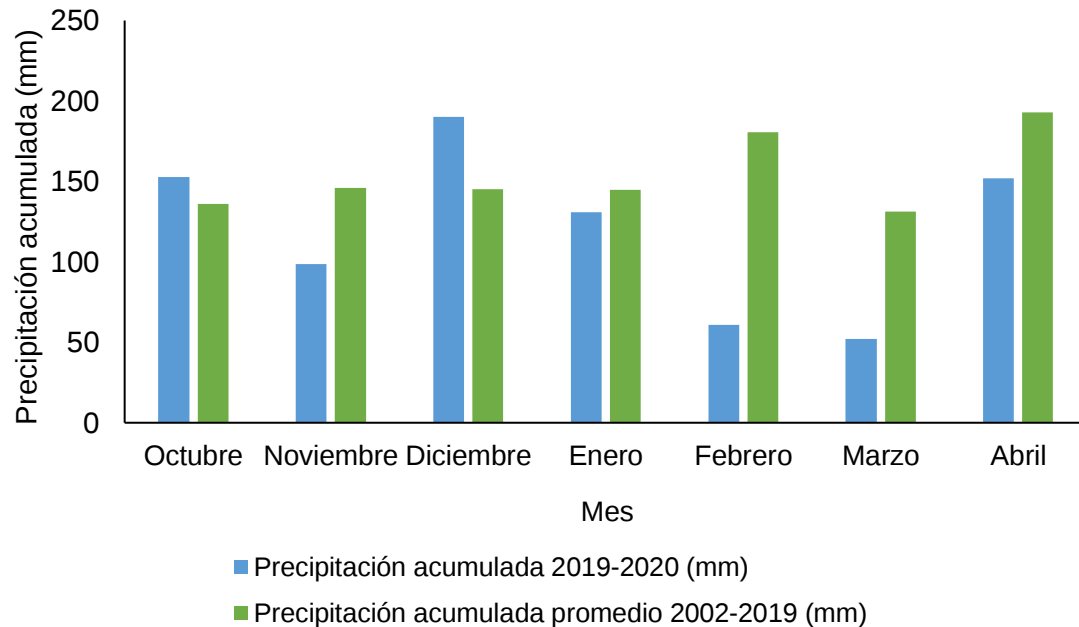
$$\text{GD} = \sum ((T \text{ máxima} - T \text{ mínima}) / 2) - T \text{ base}$$

3.4. CONDICIONES CLIMÁTICAS EN EL PERÍODO DEL CULTIVO

3.4.1. Precipitaciones

Se observan las precipitaciones (mm) ocurridas en la EEMAC, en una serie histórica de 17 años (2002-2019) y las precipitaciones ocurridas al año de

estudio, en base a los datos recabados y proporcionados de la estación meteorológica de la EEMAC y el campo experimental de riego, respectivamente (Figura 2)



La barra verde muestra las precipitaciones acumuladas (mm) en la EEMAC en un promedio histórico (2002-2020) y la azul detalla las precipitaciones acumuladas (mm) en el año agrícola del ensayo (2019-2020).

Figura 2. Precipitaciones mensuales acumuladas en el periodo 2002-2019 y en el periodo 2019-2020 según mes del año

3.4.2. Radiación solar

Cuadro 3. Ración solar incidente acumulada en la etapa vegetativa (VE), en R1-R3, en el periodo crítico (R4-R6) y en el ciclo total (MJ. m⁻²) en las diferentes fechas de siembra (FS): 10 octubre, 11 noviembre y 10 diciembre

Fecha de siembra	Radiación incidente acumulada en vegetativo (MJ.m ⁻²)	Radiación incidente acumulada en R1- R3 (MJ.m ⁻²)	Radiación incidente acumulada en PC (MJ.m ⁻²)	Radiación incidente acumulada total del ciclo (MJ.m ⁻²)
10 octubre	924	1079	683	3293
11 noviembre	1244	856	522	3157
10 diciembre	1091	626	518	2764

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO

4.1.1. Radiación solar incidente diaria en las etapas fenológicas de soja según fecha de siembra y duración de las etapas fenológicas del cultivo según fecha de siembra

En la Figura 3, se presenta la radiación solar incidente acumulada total del año de ensayo, la radiación solar incidente acumulada total de una serie histórica y la duración de los eventos fenológicos de soja para las tres fechas de siembra evaluadas.

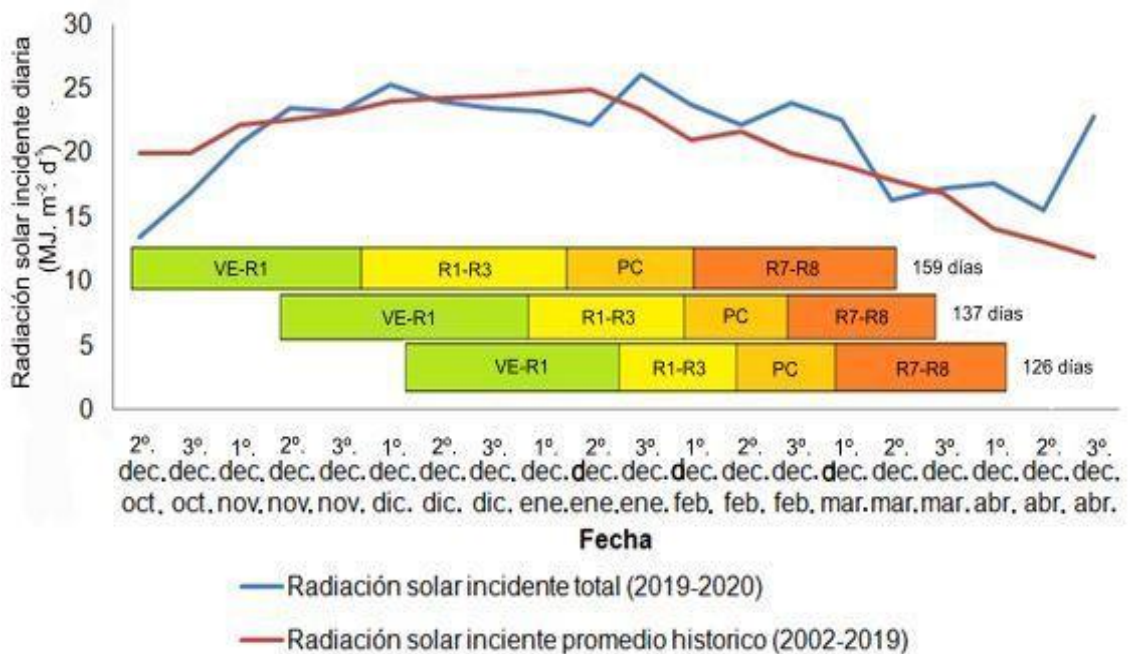


Figura 3. Radiación solar incidente (MJ.m²) y ubicación temporal por décadas (dec.) mensuales de las etapas fenológicas vegetativa VE-R1, R1-R3; R4-R6 y R7-R8 de soja para las épocas de siembra: 10 de octubre, 11 de noviembre y 10 de diciembre de 2019

En la Figura 3, se puede observar que la RS incidente en la totalidad del ciclo de la FS de diciembre (2764 MJ.m²) fue 21% inferior a la registrada en la FS de octubre (3293 MJ. m²) y 12% por debajo de la FS de noviembre (3157 MJ. m²). Por lo tanto, se evidencia que al retrasar la FS se produjeron descensos en los niveles de RS incidente total del ciclo, principalmente entre las FS de diciembre con las FS más tempranas. Estas diferencias en la RS incidente total

que se acumulan son dependientes de la duración del ciclo, la FS de octubre fue la que presentó una duración del ciclo mayor y la FS de diciembre la menor. Cabe destacar, que la mayor o menor duración del ciclo se encuentra regulada por el fotoperíodo y la acumulación térmica (Toledo, 2018).

La RS incidente acumulada varió según la FS en estudio, en el estadio reproductivo las FS de octubre noviembre y diciembre fue de 2624, 1943 y 1703 MJ.día⁻¹, y siguiendo una misma tendencia se acumuló durante el PC 685, 518 y 522 MJ.día⁻¹ para las mismas, datos similares a los reportados por Villar y Cencig (2007). Asimismo, la duración de la etapa reproductiva fue de 111, 82 y 81 días y del PC fue de 27, 22 y 21 días para las FS de octubre, noviembre y diciembre respectivamente. Se puede concluir entonces que en la FS de octubre debido a que la RS incidente diaria promedio fue más alta y sumado a una duración mayor de las etapas reproductivas y del PC, se tradujo en una acumulación mayor de RS incidente en el período reproductivo y el PC, en la totalidad del ciclo concordando con lo reportado por Gaso et al. (2015).

Por otro lado, las RS incidentes acumuladas durante el período vegetativo fueron de 924, 1244 y 1091 MJ.m⁻² para las FS de octubre, noviembre y diciembre, respectivamente. La RS incidente acumulada mayor de la FS de noviembre, se explicó por una duración mayor del período vegetativo y por una RS incidente diaria promedio alta, aunque similar a la de la FS de diciembre, pero esta última tuvo una duración menor en días de dicha etapa (46 días). La FS de octubre acumuló RS durante el período vegetativo menores, explicado por una RS incidente diaria promedio menor que las FS de noviembre y diciembre, con una duración en días similar a la FS de diciembre.

La RS diaria incidente presentó su máximo durante la tercera década de enero (26,1 MJ.m⁻². d⁻¹), donde se ubicaron el PC de la FS de octubre, el período reproductivo temprano de la FS de noviembre y la finalización de la etapa vegetativa de la FS de diciembre. Dicha RS incidente diaria alta favoreció el crecimiento reproductivo de las FS de octubre y noviembre, mientras que para la FS de diciembre el crecimiento vegetativo, debido a que los mayores niveles de RS incidentes permiten niveles de fotosíntesis mayores (Board y Harville, 1993).

Por lo tanto, se concluye que al cambiar la FS permite diferentes cosechas de RS incidente. La FS de octubre mostró una mayor duración del ciclo, del período reproductivo y fundamentalmente del PC, permitiendo de esa manera una acumulación mayor de RS incidente en las etapas reproductivas (R1-R8) sumado a que la RS incidente diaria promedio fue mayor, no siendo así en etapas vegetativas (VG).

Cabe destacar que la RS incidente histórica fue 11,6% menor que la ocurrida en la temporada en estudio desde la tercera década de enero y más marcadamente durante la tercera década de febrero y la primera década de marzo (16,5% mayor). Durante este periodo se ubicó el final del PC de la FS octubre y el PC completo de las FS de noviembre y diciembre.

4.1.2. Temperaturas mínimas, medias y máximas

En el Cuadro 4, se observan las temperaturas mínimas, medias, máximas y promedio de la serie histórica (2002-2019) de las diferentes FS evaluadas para las etapas fenológicas siguientes: VE, R1-R3, R4-R6, R7-R8 (Fehr y Caviness, 1977).

Cuadro 4. Temperaturas mínimas, temperaturas medias, temperaturas máximas y temperaturas de la serie histórica (2002-2019) para las tres fechas de siembra en las diferentes etapas fenológicas VE, R1-R3, R4-R6, R7- R8

Fecha de siembra	Temp. mínima	Temp. media	Temp. máxima	Temp. media de la serie histórica (2002-2019)
	VE-R1			
Octubre	18,1	20,3	22,4	19,6
Noviembre	18,7	22,7	26,7	22,6
Diciembre	18,2	23,8	29,3	24,3
	R1-R3			
Octubre	17,0	22,7	28,3	23,4
Noviembre	18,5	24,3	30,1	24,9
Diciembre	19,0	24,6	30,8	24,3
	R4-R6			
Octubre	19,2	24,7	30,4	24,8
Noviembre	17,5	23,0	28,8	23,7
Diciembre	16,1	23,0	29,9	23,0
	R7-R8			
Octubre	17,6	23,7	30,1	23,1
Noviembre	17,7	24,2	31,1	21,8
Diciembre	15,0	20,8	27,3	20,4

En el Cuadro 4, se puede observar que la duración entre VE y R1 fue de 48, 52 y 45 días para las FS de octubre, noviembre y diciembre, respectivamente. Esto concuerda con lo que reportaron Wilkerson et al. (1989), Bastidas et al. (2008). En este ensayo se pudo observar un efecto de los fotoperiodos poco inductivos del momento y el efecto de las temperaturas más frías cuando se compara la FS de noviembre con la FS de diciembre, siendo la duración de VE a R1 7 días mayor en la FS de noviembre (Cuadro 4). Esto no es así cuando la FS es octubre, ya que, teniendo temperaturas medias de 20,3 °C y un menor efecto inductivo del fotoperíodo, si se compara con la FS de diciembre con una temperatura media de 28,3 °C y fotoperiodos fuertemente inductivos, la duración es sólo tres días mayor.

Como se observa en el Cuadro 4, las temperaturas máximas de la FS diciembre son similares a las de la FS octubre entre R4-R6, esto no es así, desde el período VE-R1 y R1-R3 donde las máximas son 7°C y 2,8°C respectivamente más que la FS de octubre, provocando una menor duración de dichas etapas siendo que en el período R1-R3 presentan dichas FS una diferencia de 18 días (Figura 3), concordando con lo reportado por Salvagiotti (2009). Sin embargo, esta diferencia en días de R1-R3 no solo se debe a un efecto de la temperatura, sino que también a un efecto fotoperiódico que para el caso de la FS de diciembre los días se están acortando (Criswell y Hume, 1972) a diferencia de la FS de octubre que los días aún se están alargando. Por otro lado, las temperaturas mínimas son en el PC de la FS de diciembre 3°C menor cuando se compara con la FS de octubre, por lo tanto, en el PC es el fotoperíodo fue el que se encontró incidiendo sobre el acortamiento de la etapa, siendo la FS diciembre 6 días menor que la FS de octubre.

En el Cuadro 4, se aprecia que en la FS de octubre el PC se desarrolló bajo temperaturas medias de 24,7 °C, siendo esta temperatura mayor en 1,8 y 1,6°C que en los PC de FS de noviembre y diciembre respectivamente. Por lo tanto, la mayor duración del PC en la FS de octubre no se vinculó a la temperatura, por lo que se deduce que el factor que influyó en la duración del PC fue el fotoperíodo. La FS de octubre presentó fotoperíodos más largos que los de las FS de noviembre y diciembre, por lo tanto, las etapas se vieron enlentecidas porque la soja tiene respuesta fotoperiódica de día corto, esto concuerda con lo reportado por Kantolic y Slafer (2001).

En relación a las temperaturas de enero, la máxima superó los 30°C pero nunca fue mayor a 35°C. En este mes la FS de octubre se encontraba en la mitad del PC, mientras que la FS de noviembre se encontraba en etapas reproductivas tempranas (R1-R4) y la FS de diciembre se encontraba finalizando la etapa

vegetativa e iniciando el periodo reproductivo. Para todas las FS, el rango de temperaturas se encontró dentro del óptimo para la fotosíntesis (Kantolic, 2008).

En contraste a lo anterior, en la primera quincena de marzo las temperaturas máximas registradas fueron de 34°C en promedio. Durante este periodo la FS de octubre se encontraba en R7-R8, mientras que la FS de noviembre se encontraba en R6-R7 y la FS de diciembre se encontraba en R5-R6 (PC).

4.1.3. Suma térmica de las etapas vegetativas y reproductivas según la fecha de siembra

En el Cuadro 5, se observa las sumas térmicas para las diferentes fechas de siembra en sus distintos estadios fenológicos: VE-R1, R1-R3, R4-R6, R7-R8.

Cuadro 5. Sumas térmicas de las etapas fenológicas vegetativa (VE-R1), y reproductivas: R1-R3; R4-R6; R7-R8 (Fehr y Caviness) para las fechas de siembra (FS) de octubre, noviembre y diciembre

Suma térmica	FS de octubre	FS de noviembre	FS de diciembre
VE-R1	504	674	633
R1-R3	549	474	365
R4-R6	400	280	277
R7-R8	579	425	378
Total	2032	1853	1652

En el Cuadro 5, se puede apreciar que las sumas térmicas siguen la misma tendencia que la RS incidente. Las sumas térmicas acumuladas en todo el ciclo son mayores en la FS de octubre, también en la etapa reproductiva (R1-R8) y fundamentalmente en el PC, pero no así durante el período vegetativo (VE-R1). Esto se asocia a que dichas etapas tienen una duración mayor cuando se compara con las FS de noviembre y diciembre concordando con lo reportado por Villar y Cencing (2007). La suma térmica total del ciclo de la FS de octubre fue mayor en 179 GD que la FS de noviembre y de 380 GD que la FS de diciembre.

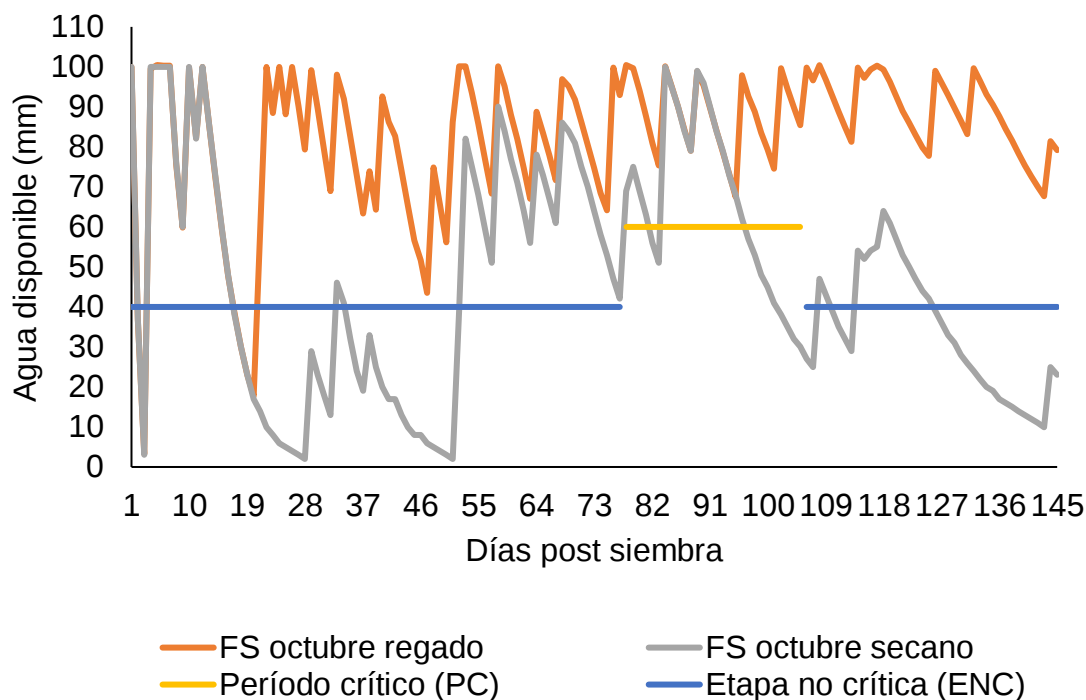
La FS de octubre acumuló entre R1-R8 1527 GD, lo cual es 673 GD superior a lo registrado en la FS de noviembre y 632 GD más que la FS de diciembre, dichas diferencias en GD fueron mayores que lo observado en la totalidad del ciclo, pero conservando una misma tendencia. Esto se debe a que

el cultivo para las FS de noviembre y diciembre debió completar sus etapas fenológicas en menor periodo de tiempo debido a una respuesta fotoperiódica, a pesar de que el promedio diario de temperatura es similar 23,6, 23,9 y 22,6 °C para las FS de octubre, noviembre y diciembre, respectivamente.

Durante el PC se observa una gran diferencia de acumulación de suma térmica cuando se compara las FS de octubre, noviembre y diciembre siendo la primera un 120 y 123 GD mayor respectivamente. Dicha tendencia registrada sigue la misma línea que la suma térmica total y de la etapa reproductiva, esto indica que las FS tempranas en octubre requieren acumular una cantidad de GD mayor para completar sus diferentes fases de desarrollo. Además, la temperatura media del ciclo fue menor, por tanto, la duración del ciclo es mayor.

4.1.4. Evolución del agua disponible en el suelo

En las Figuras 4, 5 y 6, se presenta la evolución del porcentaje de agua disponible bajo condiciones de secano y riego, en las FS evaluadas de octubre, noviembre y diciembre, respectivamente.

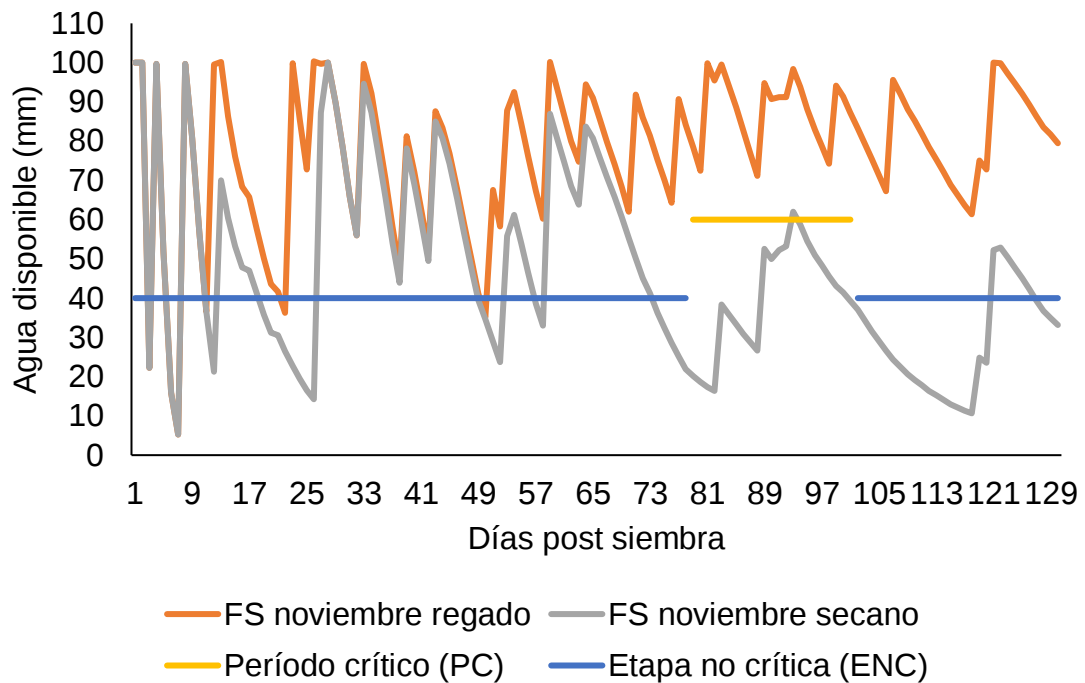


Barras de color azul indican el umbral de riego para etapas no críticas (ENC) y barras amarillas indican período crítico (PC). Línea anaranjada representa el agua disponible para fecha de siembra (FS) de octubre con riego mientras que en gris se ilustra el AD para FS de octubre en secano.

Figura 4. Evolución del porcentaje de agua disponible para FS octubre

En la Figura 4, es posible observar que la FS de octubre bajo secano durante las ENC y PC del cultivo la disponibilidad hídrica se encontró por momentos por debajo del 40% y 60% que fueron los umbrales de riego utilizados, debido a las bajas precipitaciones. Esto ocurrió durante 50 días para las ENC, mientras que, en el PC, se ubicó en torno a los 10 días por debajo del umbral establecido como óptimo para el desarrollo del cultivo. Sin embargo, Giménez (2014b), reportó que deficiencias de agua acumuladas durante las etapas vegetativas y el PC impactan menos que solamente severas en el PC.

Asimismo, se puede observar que los tratamientos tanto regados como en secano, registraron el mismo porcentaje de AD durante buena parte del PC, exceptuando el final, siendo esto positivo, ya que, permitió bienestar hídrico para ambos tratamientos durante la etapa más crítica y sensible del cultivo. En esta etapa, las deficiencias hídricas provocan pérdidas de rendimientos superiores. Según lo estudiado por Giménez (2014b) esta última etapa donde el tratamiento regado se separa del secano es menos importante porque luego el estadio R6 en la soja ya se encuentran prácticamente definidos los componentes principales del rendimiento.

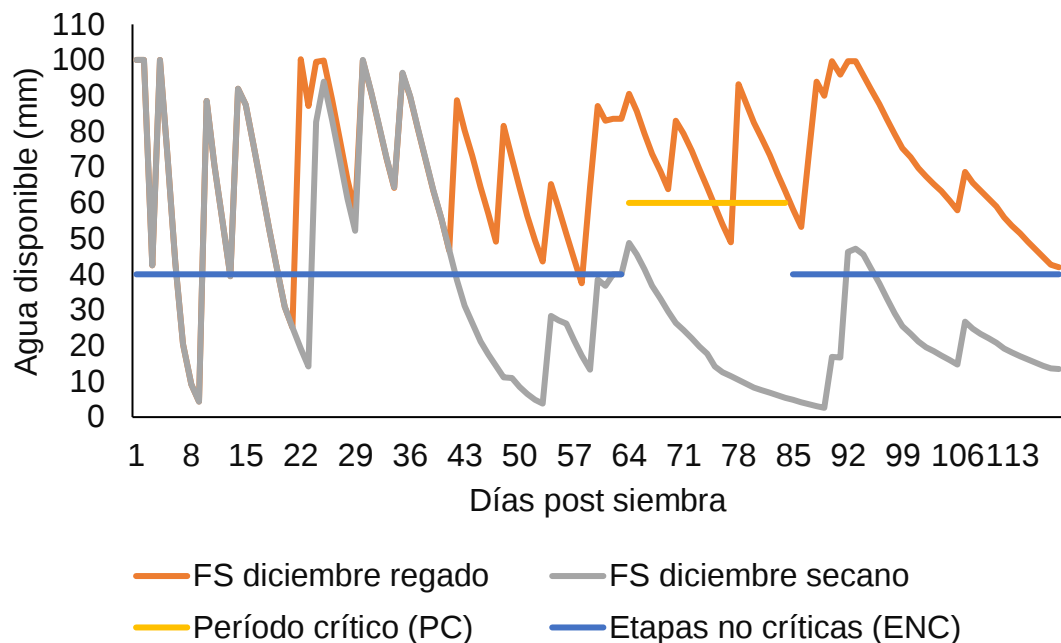


Barras de color azul indican el umbral de riego para etapas no críticas (ENC) y barras amarillas indican período crítico (PC). Línea anaranjada representa el agua disponible para fecha de

siembra (FS) de noviembre con riego mientras que en gris se ilustra el AD para FS de noviembre en secoano.

Figura 5. Evolución del porcentaje de agua disponible para FS noviembre

En la Figura 5, se presenta la evolución del AD para la FS de noviembre. En la FS de noviembre en secoano se acompaña el % de AD al regado durante las ENC, sin embargo, esto cambia durante el PC debido a que se encuentra por debajo del 60% durante toda esta etapa. Dicho período, es la etapa más sensible en la que el estrés hídrico origina pérdidas importantes en el rendimiento (Adriani et al., 1991). Asimismo, las restricciones hídricas en el PC, provocan pérdidas de hojas por un aceleramiento de la senescencia como adaptación del estrés hídrico (Adriani et al., 1991).



Las líneas azules indican el umbral de riego para etapas no críticas (ENC), y en amarillo para período crítico (PC). Línea anaranjada representa el agua disponible (AD) para fecha de siembra (FS) de octubre con riego mientras que en gris se ilustra el AD para FS de octubre en secoano.

Figura 6. Evolución del porcentaje de agua disponible para FS diciembre

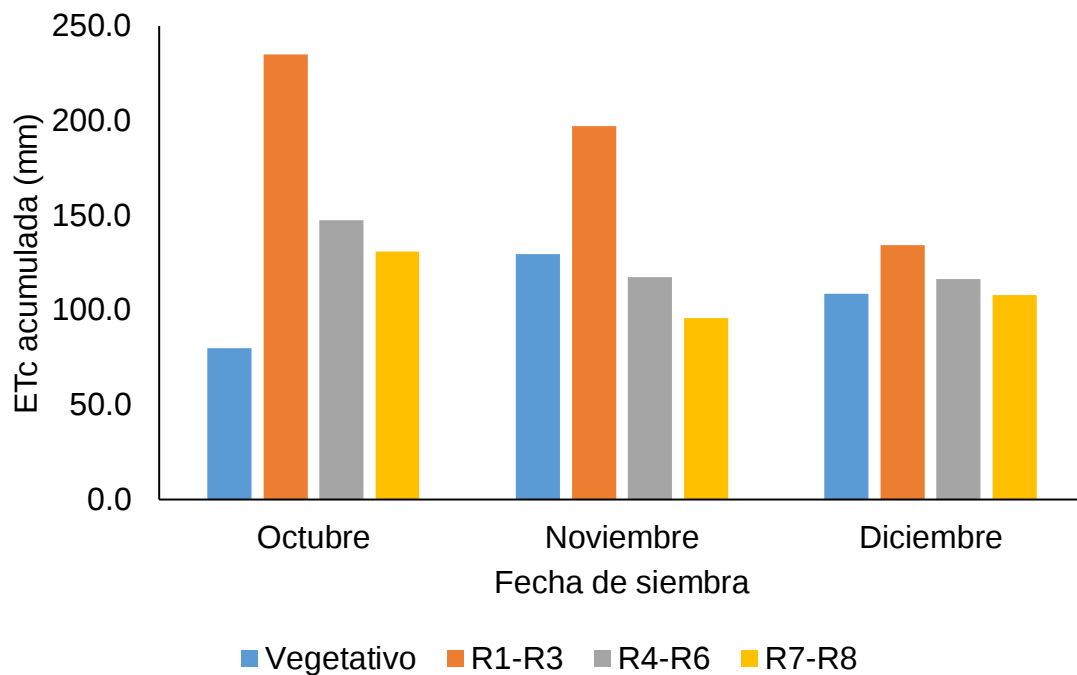
En la Figura 6, se observa que la FS de diciembre presentó una tendencia similar a la reportada para la FS de noviembre, la cual en las ENC el tratamiento bajo secoano igualó al regado en el porcentaje de AD en la mayoría del periodo previo al PC. Del total del ciclo del cultivo en condiciones de secoano, el 60% de los días se encontró por debajo del 40% y 60% de AD, sobre todo en PC, en que

no cubrió el umbral crítico del 60% de AD, esto sugiere la ocurrencia de deficiencias hídricas significativas (Giménez, 2010).

4.1.5. Evapotranspiración

4.1.5.1. Evapotranspiración del cultivo

En la Figura 7, se muestra la evapotranspiración del cultivo (ETc) acumulada estimada durante el ciclo de crecimiento en las FS de octubre (ETc oct.), noviembre (ETc nov.) y diciembre (ETc dic.) para las etapas fenológicas: VE-R1, R1-R3, R4-R6 y R7-R8



Las columnas azules corresponden a la ETc acumulada de la etapa vegetativa; en las columnas naranjas la ETc entre R1 y R3; en las columnas grises la ETc entre R4 y R6 y las columnas amarillas a la ETc entre R7 y R8 (Fehr y Caviness, 1977).

Figura 7. Evapotranspiración del cultivo (ETc) acumulada (mm) según etapa fenológica, para las fechas de siembra octubre, noviembre y diciembre

En la Figura 7, se observa que la ETc diaria promedio para FS de octubre es mayor cuando se encontró en la etapa R1-R3 acumulando en total 235 mm, esto es porque el cultivo demandó mayor cantidad de agua en esta etapa, a medida que aumentó el área foliar, para una misma demanda atmosférica, hasta interceptar el 95% de la radiación fotosintéticamente activa (Gerster y

Bacigaluppo, 2009). Para el caso de la FS de octubre, la ETc acumulada en el período R4-R6 es menor que en R1-R3 pero mayor que lo acumulado durante el mismo período para las otras FS, esto se explica por que en la FS de octubre tanto la ETc diaria y la duración durante el PC fueron mayores.

Por otra parte, la mayor acumulación de ETc de la FS de noviembre fue registrada también en el período R1-R3, siendo esta acumulación 197 mm. Durante el PC la ETc acumulada es menor debido a una ETc diaria por debajo a la registrada en la FS de octubre, además, la demanda atmosférica disminuye porque se registran menores niveles de RS incidente (Figura 3).

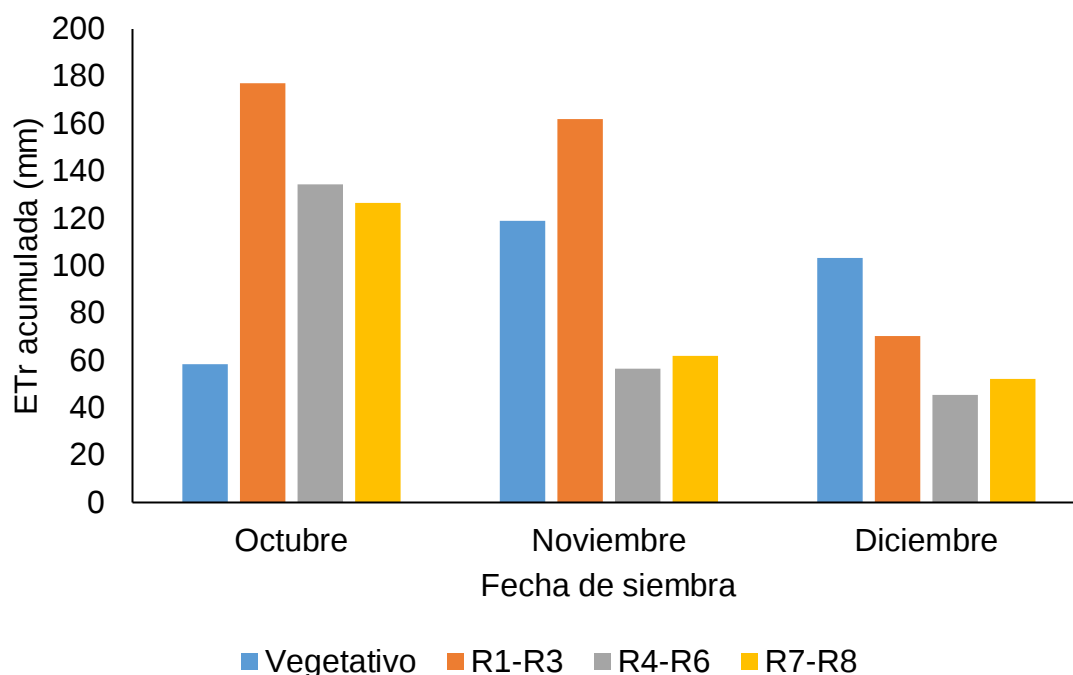
En la FS de diciembre, los valores máximos acumulados fueron 134 mm durante el período R1-R3, pero en comparación a las demás FS la variación entre períodos es baja. Durante el período R1-R3, se presentaron precipitaciones escasas (Figura 2), por debajo del promedio de la serie histórica 2002-19 en el mes de febrero, presentando por ese motivo mayores requerimientos de riego (Bastidas et al., 2008). Por lo tanto, se presentó una RS incidente superior al promedio histórico (Figura 3) debido a la baja nubosidad que existió, por ende, mayores demandas atmosféricas (García Petillo y Puppo, 2015). Esta ETc además se acentuó por existir temperaturas altas en este período desde fines de febrero y principios de marzo (Figura 2). Durante este período el cual las demandas evaporativas fueron máximas, el cultivo bajo secano se encontraba en el PC de la FS de diciembre provocando pérdidas por respiración repercutiendo en el crecimiento de los órganos reproductivos (Salvagiotti, 2009), debido a que el AD se encontraba por debajo del umbral de 60%.

En la Figura 7 se puede observar que para las tres FS las mayores acumulaciones de ETc se ubican en las etapas R1-R3, esta tendencia también fue reportada por Andriani (2000), Foster y Rovengo (2015). Es relevante entonces centrarse en la duración en que se dieron estas mayores acumulaciones de ETc que para el caso de la FS octubre el período R1-R6 es de 70 días aproximadamente, mientras que para las FS de noviembre la duración fue de 55 días y para la FS diciembre de 46 días (Figura 2).

La ETc acumulada fue de 593, 534 y 468 mm para las FS de octubre, noviembre y diciembre respectivamente, coincidiendo en la FS de noviembre con lo reportado por Andriani (2000), el cual planteó que un cultivo de soja de primera presentó una ETc en todo su ciclo de 530 mm aproximadamente, ya que, el experimento fue en la FS de noviembre y esta depende de la demanda atmosférica, de la duración del ciclo y del área foliar. Por lo tanto, se interpretó que la FS de octubre fue la que tuvo mayor ETc acumulada producto del mayor largo del ciclo del cultivo, y por las mayores ET diarias que se dieron durante más días.

4.1.5.2. Evapotranspiración real

En la Figura 8, se muestra la evapotranspiración real (ET_r) acumulada estimada durante el ciclo de crecimiento en las FS de octubre (ET_r oct.), noviembre (ET_r nov.) y diciembre (ET_r dic.) para las etapas fenológicas: VE-R1, R1-R3, R4-R6 y R7-R8



Las columnas azules corresponden a la ET_r acumulada de la etapa vegetativa; en las columnas naranjas la ET_r entre R1 y R3; en las columnas grises la ET_r entre R4 y R6 y las columnas amarillas a la ET_r entre R7 y R8 (Fehr y Caviness, 1977).

Figura 8. Evapotranspiración real (ET_r) acumuada (mm) según etapa fenológica, para las fechas de siembra octubre, noviembre y diciembre

Para el caso de la ET_r se logró observar una tendencia similar a la ET_c en cuanto a la acumulación para la FS de octubre, sin embargo, estas son menores debido a que las precipitaciones no fueron suficientes para cubrir los requerimientos del cultivo, sobre todo en el periodo vegetativo donde ocurrieron deficiencias hídricas (Figura 8). Por el contrario, se evapotranspiró casi la misma cantidad que cuando se regó en el PC y el período R7-R8, ya que, el porcentaje de AD superó los umbrales de 40 y 60%. Por otra parte, al igual que lo observado en la Figura 7, el periodo con mayor acumulación dentro de la FS de octubre fue R1-R3. Durante este período se acumuló más ET_r que en las FS de noviembre y

FS de diciembre, esto se justifica a que la duración de esta fase fue más extensa y las precipitaciones permitieron cubrir el umbral definido.

En el caso de la FS de noviembre en el período vegetativo existieron 10 mm menos de acumulación de ETr que cuando se regó (ETc), porque en casi todo el período el porcentaje de AD superó el 40%, permitiendo al cultivo bajo secano alcanzar el bienestar del cultivo. Asimismo, durante el período R1-R3 fueron 35 mm menos los acumulados que cuando se regó, ya que, del mismo modo que durante el período vegetativo se alcanzó el umbral de AD. Por el contrario, durante el período R4-R6 se acumuló apenas la mitad de lo acumulado cuando se regó, porque durante el mismo existieron deficiencias hídricas, que no permitieron al cultivo evapotranspirar de igual forma que cuando se regó.

La FS de diciembre acumuló la misma ET tanto cuando se regó (ETc) como en secano (ETr) explicado a que durante todo el período vegetativo existieron el AD se encontró por encima del umbral pautado para el bienestar hídrico del cultivo. Sin embargo, esto no es así cuando el cultivo se encontraba en el período reproductivo (R1-R6), en el cual la mayor parte del tiempo el porcentaje de AD se encontró por debajo del umbral, dando lugar a deficiencias hídricas, repercutiendo en el normal crecimiento y por ende en la capacidad de evapotranspirar.

4.1.6. Rendimiento y componentes principales del rendimiento según fecha de siembra y disponibilidad hídrica

En el Cuadro 6, se muestra el rendimiento y los componentes numéricos principales del rendimiento, es decir el número de granos por metro cuadrado y el peso promedio de granos, en las fechas de siembra de octubre, noviembre y diciembre y en las disponibilidades hídricas bajo riego y secano.

Cuadro 6. Rendimiento ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), número de granos ($\text{NG} \cdot \text{m}^{-2}$) y peso de mil granos (PMG) según fecha de siembra y rendimiento ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), número de granos ($\text{NG} \cdot \text{m}^{-2}$) y peso de mil granos (PMG) según disponibilidad hídrica

	Rendimiento ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)	NG. m^{-2}	PMG (g)
Fecha de siembra			
Octubre	6412 a	4096 a	160 a
Noviembre	4622 b	3212 b	143 ab
Diciembre	3559 c	2741 b	129 b
Disponibilidad hídrica			
Riego	6175 a	3868 a	150 a
Secano	3554 b	2831 b	137 a

Valores con diferente letra dentro de la misma columna para cada variable difieren entre sí ($p < 0.05$, Tukey).

En el Cuadro 6, se aprecia que el rendimiento mayor se obtuvo con la FS de octubre, debido a que ubicó la mayor parte del ciclo desde R1 a R8 (111 días) bajo condiciones de mayor RS incidente, superando a las FS de noviembre y diciembre en 682 y 921 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ sobre todo durante el PC en que la FS de octubre supera en 161 y 166 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ a las FS de noviembre y diciembre, respectivamente. La disminución en kg por día de atraso al pasar de sembrar en la FS de octubre a noviembre fue de $60 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. Por lo tanto, se puede concluir que una oferta de RS mayor en las etapas fenológicas reproductivas afectará de manera fundamental en definir el mayor rendimiento.

Independientemente de la FS los rendimientos son mayores cuando se encontró bajo bienestar hídrico, ya que, como plantea García Petillo (2012) el riego permite que el contenido hídrico del suelo sea suficiente como para evitar un estrés y que los rendimientos no disminuyan quedando cubierto sus requerimientos hídricos. En secano, la disponibilidad hídrica para el cultivo quedó condicionada por las precipitaciones, principalmente de las FS de noviembre y diciembre, debido a que los déficits hídricos fueron severos y sobre todo en el PC (Figuras 6 y 7) lo que resultó en rendimientos más bajos.

Por otra parte, en secano se observó una reducción en el $\text{NG} \cdot \text{m}^{-2}$, misma tendencia que el rendimiento, debido a que el rendimiento en general se ve altamente correlacionado con el $\text{NG} \cdot \text{m}^{-2}$ (Martínez et al., 2001, De Bruin y Pedersen, 2008). Al igual que para el rendimiento, el $\text{NG} \cdot \text{m}^{-2}$ menor en secano puede deberse a las restricciones hídricas que ocurrieron durante el PC en las FS noviembre y diciembre pudiendo disminuir el promedio de secano, no siendo así para la FS de octubre (Figuras 6 y 7), ya que, como lo plantean Adriani et al.

(1991) existe un efecto directo del estrés hídrico sobre las estructuras reproductivas.

Como se observa en el Cuadro 6, la FS de octubre alcanza el mayor NG.m^{-2} , el cual como se mencionó anteriormente, se correlaciona con el rendimiento. Además, se puede atribuir los mayores rendimientos de la FS de octubre al PMG cuando se compara con la FS de diciembre, concordando con lo reportado por Daroish et al. (2005). Disminuyó el PMG $0,5 \text{ g.d}^{-1}$ al atrasar de la FS de octubre a la FS de diciembre explicado a que el PMG aumenta al aumentar la temperatura dentro de un rango según lo reportado por Baker et al. (1989). Por el contrario, la FS octubre mostró PMG igual a la FS de noviembre. Se confirma así, que adelantar la FS de diciembre a octubre aumentó $0,5 \text{ g.día}^{-1}$ en el PMG. En contraposición Prieto et al. (2012), Foster y Rovegno (2015), los cuales no encontraron diferencias significativas en el PMG. Por otro lado, el menor PMG obtenido en la FS diciembre puede ser explicado por las elevadas temperaturas en los últimos 10 días del PC que fueron de 26°C en promedio (Cuadro 4), superando la óptima de 24°C que propone Salvagiotti (2009) para el óptimo desarrollo del grano.

Es posible concluir que existe una correlación positiva entre el rendimiento, el NG.m^{-2} y la RS incidente total durante todo el ciclo, la RS durante la fase reproductiva y principalmente el PC (Cuadro 3). Las FS de noviembre y diciembre presentaron igual fijación de NG.m^{-2} , debido a la similar RS incidente acumulada durante el PC, pero la FS de noviembre acumuló mayor RS incidente durante la etapa reproductiva en su totalidad y en el ciclo, obteniendo rendimientos mayores que la FS de diciembre. La FS de octubre fue la que presentó las RS incidentes acumuladas mayores en todo el ciclo, en la fase reproductiva y en el PC, por ello, los rendimientos y NG.m^{-2} mayores.

El mayor o menor rendimiento además se relaciona con la suma térmica acumulada entre R1-R8 y en especial durante el PC (Cuadro 5), siendo la FS de octubre la que acumula GD mayor seguido por la FS noviembre y diciembre, pero no existe relación entre el rendimiento y la suma térmica en el periodo vegetativo de las diferentes FS. Los resultados expuestos sugieren que en soja los rendimientos mayores, se obtienen con sumas térmicas de 400 GD (Cuadro 5) acumulados en el PC como ocurrió en la FS de octubre.

Se puede observar una relación directa entre los rendimientos alcanzados y las ETc acumuladas del ciclo en las diferentes FS (Figura 7); a mayor la ETc acumulada del ciclo como en la FS de octubre, mayor es el rendimiento, concordando con lo reportado por Canosa y Prieto (2013), Giménez (2014b). Además, en la FS de octubre se puede concluir que cuando las ETc diarias máximas se extendieron por más días, los rendimientos fueron superiores.

Se concluye que la FS de octubre es la que logró una mayor duración de las etapas desde R1 a R7 es la que obtuvo los mayores rendimientos, concordando con lo reportado por Villar y Cencig (2007). Esto se debe, a que la planta tuvo un mayor número de días para la formación de estructuras reproductivas y llenado de grano, acumular sumas térmicas y RS incidente, lo que favoreció desde R1-R4, la floración y formación de vainas y de R3-R6 el NG.m⁻². Por el contrario, las condiciones de la FS de octubre en la etapa vegetativa fueron de una menor acumulación de RS incidente y de sumas térmicas, aun así, lograron una producción de biomasa vegetativa suficiente para que se soportara un NG.m⁻² y PMG alto, no afectando negativamente el rendimiento.

4.1.7. Rendimiento y componentes principales del rendimiento según la interacción entre FS y disponibilidad hídrica

En el Cuadro 7, se muestra el rendimiento, los componentes numéricos principales del rendimiento, es decir NG. m⁻² y PMG, en las fechas de siembra de octubre, noviembre y diciembre, bajo condiciones de riego y seco.

Cuadro 7. Rendimiento (kg. ha⁻¹), número de granos por metro cuadrado (NG. m⁻²) y peso de mil granos (PMG) según fecha de siembra bajo condiciones de riego (octubre - R, noviembre -R y diciembre - R) y seco (octubre - S, noviembre -S, diciembre - S)

	Rendimiento (kg. ha ⁻¹)	NG. m ⁻²	PMG (g)
Octubre - R	7892	4478	176
Noviembre - R	5632	3644	154
Diciembre - R	5002	3481	144
Octubre - S	4932	3714	133
Noviembre - S	3612	2779	130
Diciembre - S	2116	2000	106

Valores con diferente letra dentro de la misma columna para cada variable difieren entre sí (p<0.05, Tukey).

En el Cuadro 7, se observa que no existe interacción entre las FS y las disponibilidades hídricas evaluadas, concordando con lo reportado por Seibane (2005), Prieto et al. (2012). En cambio, se observa una tendencia similar del efecto FS y disponibilidad hídrica a la del Cuadro 6, siendo que para el rendimiento la FS de octubre es mayor a la de noviembre y está a la de diciembre, e independientemente de la FS, cuando se regó se obtuvieron rendimientos,

NG.m⁻² y PMG mayores. En tal sentido, se observó un efecto de la disponibilidad hídrica con aumentos de 2621 kg. ha⁻¹ cuando se riega (Cuadro 6).

Asimismo, cuando la condición hídrica es de seco, no es posible concluir definitivamente que la FS de octubre es la mejor FS, debido a que fue un año con buenas precipitaciones en la totalidad del ciclo para la FS de octubre. Las precipitaciones del mes de diciembre fueron superiores a las de la serie histórica (Figura 2) y enero presentó precipitaciones similares a las de la serie, pero con una buena distribución como se puede observar en la evolución del agua disponible (Figura 4). Además, se observó que las precipitaciones acumuladas para las diferentes FS difirieron, siendo mayor la acumulación en la FS de octubre (680 mm), seguido por la FS de noviembre (485 mm) y FS de diciembre (450 mm, Figura 2), concordando con lo reportado por Vicente (2019), esta acumulación diferencial se explica por la duración del ciclo y por la distribución de las precipitaciones. Por otro lado, la ETc de la FS de octubre durante el PC y las etapas vegetativas fue de 147 y 314 mm respectivamente (Figura 8), y las precipitaciones fueron de 131 y 339 mm, lo que pudo satisfacer la mayor parte de lo demandado por el cultivo en el PC y en la etapa vegetativa.

Adelantar la FS de noviembre a octubre provocó efectos positivos sobre el rendimiento y en uno de los componentes numéricos principales del rendimiento (NG.m⁻², Cuadro 6), dado que el PC se ubicó en condiciones de RS mayor y temperaturas superiores (Figura 3 y Cuadro 5), tal como lo reporta Giménez (2007). A pesar de ser una especie C3, se interpreta que las RS incidentes máximas en condiciones de riego no presentan efectos negativos, como sugiere Salvagiotti (2009) el cual menciona que la obtención de rendimientos altos se ve limitada por la fotorespiración. Sin embargo, estas pérdidas son menores a causa de que el mantenimiento de niveles óptimos de humedad en el suelo.

Se concluye que en la FS de octubre con RS incidentes durante todo el ciclo aproximadamente de 3300 MJ.m⁻², con temperaturas óptimas y en condiciones regadas fue la condición que mayores rendimientos obtuvo, aun sabiendo que no existe interacción entre FS y la disponibilidad hídrica. No obstante, en la FS de diciembre en la que la RS incidente se ubicó por debajo de los 2500 MJ.m⁻², con temperaturas promedio menores a las óptimas durante el PC, y en condiciones regadas, los rendimientos alcanzados fueron de casi 5 toneladas. Este aspecto coincide con lo reportado por Salvagiotti (2009), ya que, al existir bienestar hídrico durante todo el ciclo, la RS es un factor que determina el rendimiento potencial.

4.1.8. Subcomponentes del rendimiento según fecha de siembra y disponibilidad hídrica

En el Cuadro 8, se observan los subcomponentes del rendimiento, la altura y como estos se vieron afectados por las fechas de siembra: octubre, noviembre, diciembre y por la disponibilidad hídrica, regado o seco.

Cuadro 8. Número de granos por planta (NG.pl⁻¹), número de vainas por planta (NV.pl⁻¹), número de granos por vaina (NG. vaina⁻¹), número de abortos de vainas por planta (NAV.pl⁻¹) según fecha de siembra o disponibilidad hídrica

	NG. planta ⁻¹	NV. planta ⁻¹	NG. vainas ⁻¹	NAV. planta ⁻¹
Fecha de siembra				
Octubre	119 a	49 a	2,44	1,55 ab
Noviembre	104 b	42 b	2,49	0,50 b
Diciembre	84 c	35 c	2,34	2,64 a
Disponibilidad hídrica				
Riego	112 a	45 a	2,51 a	1,02 b
Secano	92 b	39 b	2,37 b	2,11 a

Valores con diferente letra dentro de la columna difieren entre sí (p<0.05, Tukey).

En el Cuadro 8, se observa que el NG.pl⁻¹ y el NV.pl⁻¹ es mayor en la FS de octubre seguido por la FS de noviembre y la FS de diciembre concordando con De Bruin y Pedersen (2008), Kumagai y Takahashi (2020). Es decir, se constató la misma tendencia que la registrada para el rendimiento (Cuadro 6), dado que dichas variables condicionan un mayor NG.m⁻² (Cuadro 6) el cual es uno de los componentes principales del rendimiento (Kantolic et al., 2003). Las mismas variables también son mayores cuando se riega independientemente de la FS analizada, ya que, bajo bienestar hídrico la planta cubre sus requerimientos y puede mantener el crecimiento de los subcomponentes del rendimiento.

En seco el mayor NAV.pl⁻¹ y el menor NG.vaina⁻¹ es producto de las deficiencias hídricas que se dieron durante el ciclo para las tres FS. En la FS diciembre el NAV.pl⁻¹ es mayor que la FS de noviembre, debido a que en seco se dieron deficiencias hídricas durante más días y sobre todo en el PC (Figuras 5 y 6). El NAV.pl⁻¹ determina la sobrevivencia de las vainas y, por lo tanto, condiciona los resultados obtenidos en el rendimiento (Cuadro 6, Kantolic et al., 2003). Por otro lado, la FS de diciembre no difiere a la FS de octubre en NAV.planta⁻¹, ya que, la FS de octubre al haber recibido condiciones de mayor RS acumulada durante el período reproductivo (Cuadro 3), se produjeron muchas

vainas pequeñas que, en condiciones de secano, no pudieron mantenerse por las deficiencias hídricas ocurridas (Figura 4, Giménez, 2014b).

Asimismo, el NG.vaina^{-1} contribuye al NG.m^{-2} y este se correlaciona con el rendimiento. En condiciones de deficiencias hídricas, no se logró mantener el NG elevados debido a la competencia por fotoasimilados en su crecimiento, al igual que destaca Giménez (2014b). Esto coincide además con lo reportado por Kantolic et al. (2003) que indican que posibles estreses generados en esta etapa, provocan una merma en el rendimiento producto de una reducción en la capacidad de compensación del cultivo provocado por los abortos ocurridos en las vainas más pequeñas.

Por otra parte, se interpretó que el incremento de NAV.pl^{-1} al atrasar a la FS a diciembre es consecuencia de que en los primeros días de marzo se registraron temperaturas máximas de 37 °C (Cuadro 4), esto ocurrió en el transcurso del PC de la FS diciembre. Quijano (2015) plantea que durante dicho período se desarrollan subcomponentes del rendimiento que involucran vainas y NG.vaina^{-1} , por lo que los factores ambientales pueden producir efectos directos sobre las estructuras reproductivas. Por lo tanto, este efecto del mayor NAV.planta^{-1} resultó en un menor NG.pl^{-1} lo que lleva a que el componente principal del rendimiento NG.m^{-2} sea menor, siendo una de las causas del menor rendimiento de diciembre.

4.1.9. Materia seca a R1, R4 y R6, índice de cosecha y altura de planta

En el Cuadro 8, se observa la materia seca (MS, kg. ha^{-1}) depositada a R1, R4 y R6, el índice de cosecha (IC) y la altura de planta (cm) y como estos parámetros se ven afectados por las diferentes disponibilidades hídricas (riego y secano) y fechas de siembra (octubre, noviembre y diciembre).

Cuadro 9. Materia seca acumulada a R1 (MS a R1 kg. ha⁻¹), materia seca acumulada a R4 (MS a R4 kg. ha⁻¹), materia seca acumulada a R6 (kg. ha⁻¹), índice de cosecha (IC) y altura (cm) según fecha de siembra y materia seca acumulada a R1 (MS a R1 kg. ha⁻¹), materia seca acumulada a R4 (MS a R4 kg. ha⁻¹), materia seca acumulada a R6 (kg. ha⁻¹), índice de cosecha (%IC) y altura (cm) según disponibilidad hídrica riego y secano

	MS a R1 (kg. ha ⁻¹)	MS a R4 (kg. ha ⁻¹)	MS a R6 (kg. ha ⁻¹)	IC (%)	Altura (cm)
Fecha de siembra					
Octubre	1013 c	7894 ab	15924	38 a	87 b
Noviembre	2991 a	8670 a	15116	26 b	115 a
Diciembre	2127 b	5639 b	14599	20b	77b
Disponibilidad hídrica					
Riego	2127	7926 a	15927	34 a	99.9 a
Secano	1960	6876 b	14500	22 b	86.27 b

Valores con diferente letra dentro de la columna difieren entre sí (p<0.05, Tukey).

En el Cuadro 9, se puede apreciar que la MS a R1 es mayor en la FS noviembre, seguido por la FS de diciembre y octubre. Esto se explica por la acumulación de RS incidente mayor durante el período vegetativo de la FS de noviembre, al cual le sigue la FS de diciembre y octubre (Figura 3). Esto resulta que en la FS de noviembre se producen plantas con un crecimiento vegetativo superior a la FS de octubre debido a un ambiente de RS incidente alta durante el período vegetativo, mientras que para la FS de octubre las mayores RS incidentes ocurren durante el período reproductivo por lo que a R4 se observa que la FS de octubre alcanza en kg de MS a la FS de noviembre.

Cabe destacar que al pasar de R1 a R4 la FS de octubre acumuló 6881 kg.ha⁻¹ en un período extenso de 41 días, debido a que la RS incidente fue de 1080 MJ.m⁻², mientras tanto las FS de noviembre y diciembre acumularon 5679 y 3512 kg MS.ha⁻¹, recibiendo RS incidentes de 855 y 625 MJ.m⁻² en 33 y 25 días, respectivamente. Se concluye entonces que, a mayor RS incidente y duración de dicha etapa, mayor es la acumulación de MS.

En tanto, la MS a R4 no presentó diferencias entre las FS de octubre y noviembre debido a una igual acumulación de RS incidente desde el período vegetativo hasta R3 (Cuadro 3). Sin embargo, sí se constataron diferencias en la MS a R4 al atrasar de la FS de noviembre a diciembre, ya que, en la FS de noviembre se acumuló 383 MJ.m⁻² más de RS incidente en el período vegetativo hasta R3. Se registró una reducción de 101 kg. día⁻¹ en la MS a R4 al atrasar la

FS de noviembre a diciembre, dicha tendencia es superior a la reportada por Martínez et al. (2001) quienes registraron reducciones de entre 43 - 64 kg. ha. día⁻¹ al atrasar la FS.

En secano las tres FS en promedio presentaron una acumulación de MS a R4 13% menor con respecto a los tratamientos regados. Esto es concordante con lo reportado por Andrade y Sadras (2000), los cuales indicaron que los cultivos sometidos a deficiencias hídricas reducen la interceptación de RS y/o disminuyen la eficiencia de conversión de RS interceptada en biomasa y debido a que bajo déficit hídrico se repercute la capacidad de producir MS (Andriani et al., 1991).

Al atrasar la FS no se observaron cambios en la acumulación de MS a R6 y tampoco debido a la diferencia en la disponibilidad hídrica. Los valores alcanzados de MS al final del PC se encontraron en el rango de 14500-15924 kg.ha⁻¹ con valores de RS incidente de entre 2700-3200 MJ.m⁻², similares valores fueron reportados por Giménez (2014b) que obtuvo volúmenes de MS por encima de los 16000 kg ha⁻¹ con RS de 3300 MJ. m⁻².

Asimismo, a pesar de que la MS a R6 no difiere entre las FS, la ETc acumulada durante el ciclo es superior en la FS de octubre (Figura 4), por lo que en este ensayo no se encontró una correlación entre ETc y MS. Lo anterior podría explicarse a que existió un efecto de diferente distribución de los recursos entre los componentes reproductivos y vegetativos, siendo la FS de octubre favorecida la parte reproductiva, por lo tanto, obteniendo mayores rendimientos (Cuadro 6) y la FS de noviembre la vegetativa, observándose una mayor altura de planta. Por ende, se ubica los niveles de RS incidente, ETc máxima y sumas térmicas mayores en diferentes fases del cultivo.

El IC para las tres FS mostró variabilidades de entre 32% y 47%, registrándose el máximo en la FS de octubre y el más bajo la FS de diciembre. Esto permite concluir que a medida que se atrasa la FS el IC disminuye, datos similares reportan Martínez et al. (2001). Los valores de IC más altos se registran para la FS de octubre, la cual presenta el rendimiento mayor (Cuadro 6). Según Baigorri (2003) en situaciones con disponibilidad hídrica no limitante, el rendimiento depende de la cantidad de biomasa vegetativa producida y del IC.

Esta situación, resulta en que el incremento del IC en la FS de octubre se debe a una combinación entre la mayor partición de fotoasimilados a órganos reproductivos producto de las RS incidentes mayores durante PC (Cuadro 3) que resultan en mayores tasas fotosintéticas (Passioura, 1996). Además, de una acumulación de suma térmica durante el PC mayor y una duración de la etapa de llenado de granos mayor, justificando los máximos rendimientos registrados

para la FS de octubre que se obtiene con iguales producciones de biomasa a R6 que la FS de noviembre y diciembre.

Por otra parte, la altura de planta fue mayor en la FS de noviembre no siendo diferente entre las FS de octubre y noviembre, esto indica que la FS de noviembre tuvo un mayor crecimiento vegetativo y menor crecimiento reproductivo en comparación a la FS de octubre por lo anteriormente mencionado.

5. CONCLUSIONES

La FS de octubre fue la que acumuló las RS incidentes y las sumas térmicas mayores durante la totalidad del ciclo, la etapa reproductiva (R1-R8) y durante el PC, esto justificó los rendimientos mayores en relación a las FS de noviembre y diciembre evaluadas.

La ubicación temporal del PC en FS de octubre de una variedad de ciclo corto (GM V) coincidió con las RS incidentes y temperaturas mayores que las de la FS de noviembre y diciembre. Estas condiciones permitieron maximizar el rendimiento por más que la soja sea una especie de tipo fotosintético C3 de origen templado.

Se concluye que los niveles de RS incidente acumulada en el ciclo de aproximadamente $3300 \text{ MJ} \cdot \text{M}^{-2}$ y en el PC de $680 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, permitieron alcanzar los mayores rendimientos los que fueron explicados por la combinación de un $\text{NG} \cdot \text{m}^{-2}$ y un PMG altos. Los valores de RS incidente en el ciclo fueron levemente superiores al promedio. A partir de esta información, es posible afirmar que las siembras tempranas de la primera década de octubre en condiciones de riego permiten lograr los mejores rendimientos en variedades de ciclo corto.

La FS de octubre en seco permitió igualmente que en condiciones de riego lograr rendimientos mejores que en las demás FS evaluadas, sin embargo, las condiciones hídricas están determinadas por el año y no poseen repetibilidad. En condiciones de seco, importa continuar las evaluaciones para comprobar el comportamiento productivo del cultivo en diferentes condiciones hídricas.

6. RESUMEN

En el año agrícola 2019-20 se realizó un experimento de soja (*Glycine max*, L.) en la Facultad de Agronomía. EEMAC (Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni”), en Paysandú, Uruguay. El objetivo principal fue evaluar el efecto de la fecha de siembra (FS) sobre el rendimiento de soja en condiciones de secano y de riego con la utilización de una variedad de ciclo corto y alto potencial. El ensayo consistió en utilizar tres FS (10 de octubre, 10 de noviembre y 10 de diciembre) sobre dos disponibilidades hídricas (riego y secano). Se evaluaron 6 tratamientos: FS octubre- R; FS noviembre- R; FS diciembre-R; FS octubre-S; FS noviembre-S; FS diciembre-S. No se encontró interacción entre la FS y la disponibilidad hídrica, por lo tanto, la mejor condición hídrica independientemente de la FS fue bajo riego y la mejor FS independientemente de la disponibilidad hídrica fue octubre, resultando a que cuando se sembró en octubre bajo riego se alcanzaron los máximos rendimientos de 7892 kg.ha^{-1} . Por otro lado, la FS de octubre bajo las dos disponibilidades hídricas alcanzó el máximo rendimiento con 6412 kg ha^{-1} , seguido por la FS de noviembre con 4622 kg.ha^{-1} y la FS de diciembre 3559 kg. ha^{-1} . Al atrasarse de la FS de octubre a noviembre se registró una disminución del rendimiento de $60 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{d}^{-1}$ de pérdida en el rendimiento. Las FS evaluadas en secano presentaron rendimientos 43% menores que en condiciones de riego. El NG.m⁻² de la FS de octubre fue 4096, encontrándose por encima de los obtenidos en la FS de noviembre y diciembre, los cuales no presentaron diferencias entre sí. El PMG no difirió entre las FS de octubre y noviembre siendo estos 160 y 143 g, sin embargo, se encontró que en la FS de octubre el PMG fue mayor que en la FS de diciembre. Por otra parte, La FS de octubre acumuló 7894 kg.ha^{-1} de MS a R4, la FS de noviembre no presentó diferencias con este, pero sí con la FS de diciembre. La MS a R6 no difirió significativamente entre los tratamientos evaluados. El IC fue mayor para la FS de octubre siendo este 38%, mientras que las FS de noviembre y diciembre no difirieron estadísticamente siendo estas 26 y 20%. Los atrasos en la FS además de provocar una menor duración del ciclo disminuyeron la posibilidad de acumular la RS incidente, ETc, ETr y sumas térmicas, afectando el crecimiento del cultivo, la deposición de MS a R4 y el IC. A la RS acumulada en las diferentes FS y principalmente la distribución de la misma en el ciclo, se le atribuye las diferencias en los resultados obtenidos en este experimento por la influencia sobre el rendimiento.

Palabras clave: Soja; Fecha de siembra; Rendimiento; Período crítico; Agua disponible; Riego; Secano; Bienestar hídrico; Radiación solar.

7. SUMMARY

A soybean (*Glycine max*, L.) experiment was carried out at the Faculty of Agronomy. EEMAC (Experimental Station "Dr. M. A. Cassinoni"), in Paysandú, Uruguay, in the spring-summer 2019-20. With the main objective of evaluating the effect of sowing date (FS) on soybean yield under dry and irrigated conditions with the use of a short-cycle variety with high yield potential. The trial consisted of using three FS (October 10th., November 10th. and December 10th.) on two water availability (irrigated and dry) and evaluating the effects of these alternatives on yield and its components, as well as on DM production. Six treatments were evaluated: FS October-R; FS November-R; FS Dec-R; FS Oct-S; FS November-S; FS December-S. No significant differences were found between sowing date and water availability. On average, the October sowing date under the two water availabilities reached the maximum yield with 6412 kg ha⁻¹, followed by the November sowing date with 4622 kg.ha⁻¹ and the December with 3559 kg. ha⁻¹. When moving back from the October sowing date to the November, 60 kg.ha⁻¹.d⁻¹ loss in yield was recorded. Rainfed treatments presented 43% lower performances than when irrigated. The NG.m⁻² of the October sowing date was 4096, being above those obtained in the November and December, which did not appear differences between them. The PMG did not differ between the sowing date of October and November being these 160 and 143 g, however, the sowing date of October was greater the PMG than the FS of December. On the other hand, the October sowing date accumulated 7894 kg.ha⁻¹ of dry matter at R4, the November dry matter did not present differences with this, but with the December dry matter. Dry matter at R6 did not differ significantly between treatments. The %IC was higher for the October sowing date, being 38%, while the November and December sowing date did not differ statistically, being these 26 and 20%. On the other hand, the variables NV.planta⁻¹, NG.planta⁻¹, NG.vaina-1 and NAV were analyzed. Plant. The delays in the sowing date decreased the possibility of accumulating the incident RS, decreasing the development of the crop, the deposition of dry matter to R4 and the %IC to which the differences in the results obtained in this experiment are attributed due to the influence that exerts the RS on the accumulation of dry matter and the components of the yield NG.m⁻² and PMG. The results indicate that a high NG was reached in October sowing date NG.m⁻² and PMG which resulted in higher performances.

Key words: Soybean; Sowing date; Yield; Critical period; Available water; Rain-fed; Irrigated; Water welfare; Solar irradiation.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Agorio, C.; Cardellino, G.; Corsi, W.; Franco, J. 1988. Estimaciones de las necesidades de riego en Uruguay: I. Magnitud y frecuencia de la lámina neta total. Montevideo, MGAP. 110 p.
2. Aldabe, J.; Rocca, P.; Claramunt, S. 2009. Uruguay. (en línea). In: Devenish, C.; Díaz Fernández, D. F.; Clay, R. P.; Davidson I.; Yépez Zabala, I. eds. Important Bird Areas Americas: priority sites for biodiversity conservation. Quito, Ecuador, BirdLife International. pp. 383-392 (BirdLife Conservation Series no. 16). Consultado 8 oct. 2020. Disponible en http://datazone.birdlife.org/userfiles/file/IBAs/AmCntryPDFs/Uruguay_es.pdf
3. Andrade, F. H.; Sadras, V. O. 2000. 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, Médica Panamericana. pp. 173-205.
4. Andriani, J.; Andrade, F.; Suero, E. E.; Dardanelli, J. L. 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans. I. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and its components. (en línea). Agronomie, EDP Sciences. 11(9):737-746. Consultado 19 nov. 2020. Disponible en <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00885414/document>
5. _____. 2000. Consumo de agua de los cultivos en el Sur de Santa Fe. (en línea). INTA Oliveros. Para Mejorar la Producción. no. 13:27-30. Consultado 8 mar. 2021. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Jose_Andriani/publication/265410125_CONSUMO_DE_AGUA_DE_LOS_CULTIVOS_EN_EL_SUR_DE_SANTA_FE/links/56d58a7d08ae5c281ca43b03/CONSUMO-DE-AGUA-DE-LOS-CULTIVOS-EN-EL-SUR-DE-SANTA-FE.pdf
6. Baigorri, H. 2003. Desarrollo y crecimiento de cultivares de soja en función de la fecha de siembra y su importancia en la recomendación de manejo. In: Jornada Nacional de Soja (2003, Soriano, Uruguay). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 101-114 (Actividades de Difusión no. 325).

7. Baker, J. T.; Allen, L. H.; Boote, K. J.; Jones, P.; Jones, J. W. 1989. Response of soybean to air temperature and carbon dioxide concentration. (en línea). Crop Science. 29(1):98-105. Consultado 10 ago. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.2135/cropsci1989.0011183X002900010024x>

8. Bastidas, A. M.; Setiyono, T. D.; Dobermann, A.; Cassman, K. G.; Elmore, R. W.; Graef, G. L.; Specht, J. E. 2008. Soybean sowing date: the vegetative, reproductive, and agronomic impacts. Crop Science. 48(2):727-740.

9. Benavides, A. 2003. Fotosíntesis: diferencias en las vías metabólicas C3, C4 y CAM. (en línea). s.l., Universidad Nacional del Nordeste. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura. 5 p. Consultado 8 ago. 2020. Disponible en https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/37719107/Fotosintesis_C3_C4_y_CAM_1-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1639089944&Signature=asEQMGe-DcbVStNmnZfqDHSIA9WRTdETv9rGbRXH9GzTp13ClwXq-G6jy4FWHnfuVECww3YO7DBhxXDMqN4WUtCXVJXvGXWXNuTZNB5PDulolBPLtHQfgijygFkmbWZhq3DM8-RF4jnP1J~iXHPKtZXWI8yYiXsBJYC8Fx6nJSACIZtX1cVI8CSSPIUzC3LChIjutyGjfpdxxW6b6-mWa-WYAI9~x8DViVBmrVm9jR7bN5krIJ02B-GcVLZ-3S3regbKNlhQ1yR5vxcv2FePCKoRQ9y51NHP05RxWI729CY9EMLnwYiK0kKONjrfpdQ97LOOrUS51gmw6z9a7ELTA_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

10. Black, C. C. 1986. Effects of CO₂ Concentration on photosynthesis and respiration of C₄ and CAM plants. In: Enoch, H. Z.; Kimball, B. A. eds. Carbon Dioxide Enrichment of Greenhouse Crops. Boca Raton, CRC. v. 2, pp 29-40.

11. Board, J. E.; Harville, B. G. 1993. Soybean yield component responses to a light interception gradient during the reproductive period. Crop Science. 33(4):772-777.

12. _____.; Tan, Q. 1995. Assimilatory capacity effects on soybean yield components and pod number. Crop Science. 35(3):846-851.

13. Bodrero, A. M. 2003. Algunos factores genéticos y ambientales que influyen sobre el rendimiento de la soja. In: Jornada Nacional de

Soja (2003, Soriano, Uruguay). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 1-13 (Actividades de Difusión no. 325).

14. Borthwick, H. A.; Parker, M. W. 1938. Influence of photoperiods upon the differentiation of meristems and the blossoming of Biloxi soybeans. *Botanical Gazzett*. 99(4):825-839.
15. Cámara, G. M. S.; Sedyama, T.; Dourado-Neto, D.; Bernardes, M. S. 1997. Influencia del fotoperíodo y la temperatura del aire en el crecimiento, floración y maduración de la soja (*Glycine max* (L.) Merrill). *Scientia Agricola*. 54 (special):149-154.
16. Canfalone, A.; Villacampa, Y.; Cortes, M.; Navarro, M. 2002. Crecimiento de soja en función de la temperatura del aire y de la radiación fotosintéticamente activa. *Revista Brasileira Agrociencia*. 8(3):185-189.
17. Canosa, G.; Prieto, C. 2013. Estudio del efecto de las deficiencias hídricas sobre el rendimiento de soja. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 66 p.
18. Capurro, M.; Beretta, A.; García, C.; Sawchik, J.; Puppo, L. 2017. Rendimiento de la soja en respuesta a distintas dosis y momentos de riego. (en línea). *Agrociencia (Uruguay)*. 21(2):65-76. Consultado 12 nov. 2020. Disponible en http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?pid=S2301-15482017000200065&script=sci_arttext
19. Cárcova, J.; Borrás, L.; Otegui, M. E. 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en maíz. In: Satorre, E. H.; Benez, R. L.; Slafer, G. A.; De La Fuente, E. B.; Miralles, D. J.; Otegui, M. E.; Savin, R. eds. *Producción de granos: bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires, UBA. Facultad de Agronomía. pp. 133-163.
20. Ceccon, P.; Dalla Costa, L.; Giovanardi, R.; Rogger, C. 1994. The Interaction of Sowing Date and Water Availability in Determining Plant Architecture, Fruiting Pattern and Yield Components of Soybean (*Glycine max* L. Merr.). *Journal of Agronomy and Crop Science*. 173(3-4):172-183.

21. Ceretta, S. E.; Ibáñez, V. s.f. Siembras tardías en soja: elección de grupos de madurez para minimizar posibles pérdidas de rendimiento. (en línea). Colonia, INIA. 3 p. Consultado 17 ago. 2020. Disponible en http://www.inia.org.uy/estaciones/la_estanzuela/actividades/documentos/siembras_tardias_soja.pdf
22. Confalone, A. E.; Costa, L. C.; Rodrigues, C. 1998. Crecimiento y captura de luz en soja bajo estrés hídrico. (en línea). Revista Brasileira de Agrometeorología. 5(2):165-169. Consultado 18 dic. 2020. Disponible en <http://www.sbagro.org/files/biblioteca/176.pdf>
23. Cooper, R. L. 2003. A delayed flowering barrier to higher soybean yields. Field Crops Research. 82(1):27-35.
24. Corsi, W. C. 1982. Regionalización agroclimática de Uruguay para cultivos. Miscelánea CIAAB no. 40. 29 p.
25. Cortés, E. 2015. Desarrollo de estrategias de siembra del cultivo de soja [*Glycine max* (L.) Merr] en el departamento de San Justo, Córdoba, Argentina. Tesis Esp. Prod. Cultivos Extensivos. Córdoba, Argentina. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 42 p.
26. Criswell, J. G.; Hume, D. J. 1972. Effects of environment on response of soybean to TIBA. Crop Science. 12:293-294.
27. Curto, L.; Covi, M.; Gassmann, M. I. 2019. Evapotranspiración real y patrones de extracción de agua del suelo de un cultivo de soja (*Glycine max*). (en línea). Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo. 51(2):125-141. Consultado 28 ago. 2020. Disponible en <http://www.scielo.org.ar/pdf/refca/v51n2/v51n2a10.pdf>
28. Damiano, F.; Taboada, M. A. 2000. Predicción del agua disponible usando funciones de pedotransferencia en suelos agrícolas de la región pampeana. (en línea). Ciencia del Suelo. 18(2):77-88. Consultado 20 jun. 2020. Disponible en http://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_18n2/Vol%2018%20N%20BA%202%20PDF%20ORIGINAL%20CON%20PROBLEMAS.PDF#page=5

29. Dardanelli, J.; Collino, D.; Otegui, M. E.; Sadras, V. O. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de granos. In: Satorre, E. H.; Benech, R. L.; Slafer, G. A.; de la Fuente, E. B.; Miralles, D. J.; Otegui, M. E.; Savin, R. eds. Producción de cultivos de granos: bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 375-442.
30. Daroish, M.; Hassan, Z.; Ahad, M. 2005. Influence of Planting Dates and Plant Densities on Photosynthesis Capacity, Grain and Biological Yield of Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). (en línea). Journal of Agronomy. 4(3):230-237. Consultado 8 ago. 2020. Disponible en <http://docsdrive.com/pdfs/ansinet/ja/2005/230-237.pdf>
31. De Bruin, J. L.; Pedersen, P. 2008. Soybean seed yield response to planting date and seeding rate in the Upper Midwest. Agronomy Journal. 100(3):696-703.
32. Della Maggiora, A. I.; Echarte, L.; Suero, E. E.; Irigoyen, A. I.; Gardiol, J. 1998. Deficiencia de agua en los cultivos de maíz, girasol, soja y trigo en la localidad de Balcarce. (en línea). In: Congreso Brasileiro de Meteorología (10º.), Congreso de la FLISMET (8º., 1998, Brasilia, BR). Actas. Brasilia, s.e. s.p. Consultado 30 ago. 2021. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/267857404_DEFICIENCIA_DE_AGUA_EN_LOS_CULTIVOS_DE_MAIZ_GIRASOL_SOJA_Y_TRIGO_EN_LA_LOCALIDAD_DE_BALCARCE
33. Egli, D. B.; Wardlaw, I. F. 1980. Temperature response of seed growth characteristics of soybeans. Agronomy Journal. 72(3):560-564.
34. _____. 1988. Plant density and soybean yield. Crop Science. 28(6):977-981.
35. Farías, J. R. B. 1995. Requisitos climáticos. In: Minor, H. C. ed. El cultivo de la soja en los trópicos: mejoramiento y producción. Roma, FAO. pp. 13-17 (FAO. Producción y Protección Vegetal no. 27).
36. _____.; Nepomuceno, A. L.; Neumaier, N. 2007. Fisiología da soja. (en línea). EMBRAPA. Circular Técnica no. 48:1-9. Consultado 8 ago. 2020. Disponible en <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/470308/1/circtec48.pdf>

37. Fassio, A.; Pérez, O.; Ibáñez, W.; Rabaza, C.; Vergara, G.; Sawchik, J.; Schusselin, M.; Silva, L. 2016. Soja: rendimiento con y sin riego a diferentes poblaciones de siembra. *Revista INIA*. no. 47:22-26.
38. Fehr, W. R.; Caviness, C. E. 1977. Stages of soybean development. Iowa State University. Cooperative Extension Service. Special report no. 80. pp. 929-931.
39. Figueredo, S.; Guibert, M.; Arbeletche, P. 2019. Ciclo sojero y estrategias de los actores de la producción agropecuaria en el litoral uruguayo. *Eutopía. Revista de Desarrollo Económico Territorial*. no. 16:99-118.
40. Filippi, R. 2019. El agua en diferentes estrategias productivas de soja (*Glycine max* (L.) Merr.): disponibilidad inicial, consumo y eficiencia de uso. Tesis de maestría. Buenos Aires, Argentina. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. 89 p.
41. Foster, P.; Rovegno, F. 2015. Efectos de diferentes disponibilidades hídricas en distintas etapas fisiológicas de soja sobre el rendimiento. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 60 p.
42. García Petillo, M. 2012. Conceptos básicos para el diseño y el manejo del riego. (en línea). *In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (2º, 2012, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados*. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 25-32. Consultado 3 dic. 2020. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/11843/1/Garcia-M.-2012.pdf>
43. _____.; Puppo, L. 2015. Determinación de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) para el diseño de equipos de riego en el Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*. 19(1):122-130.
44. Gaso, D.; Morales, X.; Calistro, R.; Capurro, M. C.; Silva, L.; Schusselin, M.; Sawchik, J. 2015. Potenciales de rendimiento de grupos de madurez contrastantes en diferentes épocas de siembras y ambientes. *In: Día de Campo (2015, Colonia). Memorias*. Montevideo, INIA. pp. 11-18 (Actividades de Difusión no. 743).

45. Gerster, G.; Bacigaluppo, S. 2009. Cómo alcanzar altos rendimientos en soja. (en línea). INTA Oliveros. Para Mejorar la Producción. no. 42:63-67. Consultado 8 nov. 2020. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-soja-evaluacion-estabilidad-rendimiento-segun-fe_1.pdf
46. Giménez, L. 2007. Comportamiento fenológico de diferentes grupos de madurez de soja (*Glycine max*) en Uruguay. Agrociencia (Uruguay). 11(2):1-9.
47. _____. 2010. Efectos de la disponibilidad hídrica en diferentes etapas de desarrollo de maíz y soja. (en línea). In: Seminario Internacional (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas. Paysandú, Facultad de Agronomía. pp. 29-37. Consultado 18 set. 2020. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/11829/1/Gimenez-L.-2010.pdf>
48. _____.; García Petillo, M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. Agrociencia (Uruguay). 15(2):100-108.
49. _____. 2014a. Efecto de las deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo sobre el rendimiento de soja. Agrociencia (Uruguay) 18(1):53-64.
50. _____. 2014b. Que sabemos del riego de cultivos en Uruguay y que falta por investigar. (en línea). In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (3º., 2014, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. pp. 22-34. Consultado 10 dic. 2021. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Luis-Gimenez-Rodriguez/publication/286439165_Que_sabemos_del_riego_de_cultivos_en_Uruguay_Y_que_falta_por_investigar/links/566eba0008ae62b05f0b5e49/Que-sabemos-del-riego-de-cultivos-en-Uruguay-Y-que-falta-por-investigar.pdf
51. _____. 2017. Respuesta del maíz y la soja a diferentes disponibilidades hídricas en distintas etapas de desarrollo. Agrociencia (Uruguay). 21(2):77-90.

52. _____. 2019. Rendimientos de maíz y soja: un desafío que provoca...La información experimental y la producción comercial. Cangüé. no. 42:7-12.
53. Hadley, P.; Roberts, E. H.; Summerfield, R. J.; Michin, F. R. 1984. Effects of temperature and photoperiod on flowering in soybean (*Glycine max* (L.) Merril): a quantitative model. *Annals of Botany*. 53:669-681.
54. Hatfield, J. L.; Boote, K. J.; Kimball, B. A.; Ziska, L. H.; Izaurrealde, R. C.; Ort, D. R.; Thomson, A. M.; Wolfe, D. 2011. Climate Impacts on Agriculture: implications for Crop Production. *Agronomy Journal*. 103(1):351-370.
55. _____.; Prueger, J. H. 2015. Temperature extremes: effect on plant growth and development. (en línea). *Weather and Climate Extremes*. 10:4-10. Consultado 18 set. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>
56. Ibrahim, S. 2012. Agronomic studies on irrigated soybeans in central Sudan: II. Effect of sowing date on grain yield and yield components. *International Journal of AgriScience*. 2:766-773
57. Kantolic, A.; Slafer, G. A. 2001. Photoperiod sensitivity after flowering and seednumber determination in indeterminated soybean cultivars. *Field Crops Research*. 72(2):109-111.
58. _____.; 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, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 167-186.
59. _____. 2008. Control ambiental y genético de la fenología del cultivo de soja: impactos sobre el rendimiento y la adaptación de genotipos. *Revista de la UBA. Facultad de Agronomía*. 28(1):63-88.
60. Kumagai, E.; Takahashi, T. 2020. Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) Yield Reduction due to Late Sowing as a Function of Radiation Interception and Use in a Cool Region of Northern Japan

Agronomy. 10(1):66-80. Consultado 15 nov. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.3390/agronomy10010066>

61. Lindsey, L.; Thomson, P. 2012. High temperature effects on corn and soybean. (en línea). Ohio State University Extension. CORN. News-letter Agronomic Crops Network no. 41. pp. 23-26. Consultado 15 nov. 2021. Disponible en <http://media.agricharts.com.s3.amazonaws.com/sites/1345/DroughtEffects.docx>
62. Manlla, A; Salvagiotti, F. 2011. Explorando brechas de producción y rendimiento potencial en soja: oferta de recursos y máximos rendimientos alcanzables en condiciones de campo. *In*: Congreso de la Soja del Mercosur (5º., 2011, Oliveros). Trabajos presentados. INTA Oliveros. Para Mejorar la Producción. no. 46:61-66.
63. Martínez Álvarez, D.; Baigorri, H.; Bologna, S.; Bongiovanni, M.; Lucero, R. 2002. Crecimiento de doce cultivares de GM II al VII en FS de octubre a diciembre, en Villa Mercedes (San Luis). (en línea). *In*: Reunión de la Producción Vegetal y Animal del N.O.A. (1ª., 2002, Villa Mercedes). Actas. San Miguel de Tucumán, Universidad Nacional de Tucumán. pp. 339-346. Consultado 8 jul. 2021. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/320456852>
64. Melgar, R.; Vitti, G.; de Melo Benites, V. 2011. Fertilizando para altos rendimientos: soja en Latinoamérica. Berna, Instituto Internacional de la Potasa. 174 p. (Boletín IIP no. 20).
65. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2019. Anuario estadístico agropecuario 2019. (en línea). Montevideo. 256 p. Consultado 5 nov. 2020. Disponible en <https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Anuarios/Anuario2019/Anuario2019.pdf>
66. _____. _____. 2020. Anuario estadístico agropecuario 2020. Montevideo. 270 p.
67. Neumaier, N.; Nepomuceno, A. L.; Farías, J. R. B.; Oya, T. 2000. Estádios de desenvolvimento da cultura da soja. *In*: Bonato, E. ed. Estresses em soja. Passo Fundo, EMBRAPA Trigo. pp. 21-34.

68. Otegui, M. E. 2009. Bases ecofisiológicas para el manejo del agua en cultivos para grano conducidos en secano. (en línea). Informaciones Agronómicas. no. 44:16-20. Consultado 31 ago. 2020. Disponible en [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/74910EC30051C2CE8525799500757378/\\$FILE/16.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/74910EC30051C2CE8525799500757378/$FILE/16.pdf)
69. Passioura, J. B. 1996. Drought and drought tolerance. Plant Growth Regulation. 20(2):79-83.
70. Pedersen, P.; De Bruin, J. 2009. Soybean Planting Date and Growth and Development Study. Iowa State University Research and Demonstration Farms Progress Reports. no. 1:s.p.
71. Peters, D. B.; Johnson, L. C. 1960. Soil moisture use by soybeans. Agronomy Journal. 52(12):687-689.
72. Pietrobón, M., Invinkelried, H., Dellaferrera, I., Garione, G. Haidar, L. 2019. Eficiencia de uso de agua y radiación en soja bajo competencia con sorgo de alepo. FAVE. 18(2):55-62.
73. Ponsa, J. I. 2019. Soja: efecto de la fecha de siembra, el grupo de maduración y distintos esquemas de fertilización sobre el rendimiento en pergamino Tesis Ing. Agr. La Plata, Argentina. Universidad Nacional de la Plata. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 42 p.
74. Prieto, S.; Prieto, D. R.; Angella, G. A. 2012. Evaluación de diferentes estrategias de riego deficitario controlado en el cultivo de soja [*Glycine max* (L.) Merril]. (en línea). Santiago del Estero, INTA. 10 p. Consultado 17 abr. 2021. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/conagua2013_prieto_angueira_completo.pdf
75. Quijano, Á. 2015. Regulación fotomorfogénica del número de estructuras reproductivas en conopeos de soja. Tesis de doctorado. Buenos Aires, Argentina. Universidad Buenos Aires. Facultad de Agronomía. 159 p.
76. Robinson, A. P.; Conley, S. P.; Volenec, J. J.; Santini, J. B. 2009. Analysis of high yielding, early- planted soybean in Indiana. Agronomy Journal. 101(1):131-139.

77. Rodríguez, H. J. 2017. Respuesta del maíz y la soja a distintos niveles de riego suplementario en un Vertisol de Entre Ríos. Tesis de maestría. Buenos Aires, Argentina. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. 113 p.
78. Sadras, V. O.; Milroy S. P. 1996. Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: a review. *Field Crops Research*. 47(2-3):253-266.
79. Salvagiotti, F. 2009. Manejo de soja de alta producción. (en línea). INTA Oliveros. Para Mejorar la producción. no. 42:57-62. Consultado 7 ago. 2020. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manejo_soja_alta_produccion.pdf
80. Sawchik, J.; Ceretta, S. 2005. Consumo de agua por sojas de distintos grupos de madurez en diferentes ambientes de producción (CALMER-AUSID-INIA). (en línea). In: Jornada Técnica de Cultivos de Verano (2005, Colonia). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 51-60 (Actividades de Difusión no. 417). Consultado 26 set. 2020. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/439/1/111219230807174556.pdf#page=37>
81. Seibane, H. D. 2005. Efectos de la fecha de siembra y la disponibilidad hídrica sobre el desarrollo y crecimiento de cultivares de soja de diferentes grupos de madurez, en Villa Mercedes (San Luis). Tesis Ing. Agr. San Luis, Argentina. Universidad Nacional de San Luis. 33 p.
82. Sinclair, T. R.; Muchow, R. 1999. Radiation Use Efficiency. *Advances in Agronomy*. 65:215-265.
83. Toledo R. E. 2018. Ecofisiología, rendimiento y calidad de soja. (en línea). Córdoba, Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Agropecuarias. pp. 1-12. Consultado 26 set. 2020. Disponible en <http://www.agro.unc.edu.ar/~wpweb/cereales/wp-content/uploads/sites/31/2018/07/Ecofisiologia-rendimiento-y-calidad-en-soja-.pdf>
84. Vega, C. R.; Andrade, F. H.; Sadras, V. O.; Uhart, S. A., Valentinuz, O. R. 2001. Seed number as a function of growth. A comparative

study in soybean, sunflower, and maize. Crop Science. 41(3):748-754.

84. Vicente, C. 2020. Atrasar la siembra y modificar la distancia entre hileras: ¿cómo impacta en el rinde de soja? Tesis doctoral. Buenos Aires, Argentina. Universidad Nacional de La Plata. 52 p.
86. Villalobos, E.; Avila, G.; Echandi, C. 1991. Crecimiento determinado e indeterminado de la soja en dos épocas de siembra en Costa Rica. Turrialba. 41(3):412-422.
87. Villar, J.; Cencig, G. 2007. Cultivares de soja pertenecientes a diferentes grupos de madurez en cuatro fechas de siembra. INTA Rafaela. Publicación miscelánea. no. 108:62-70.
88. Vu, J. C. V.; Allen Jr, L. H.; Boote, K. J.; Bowes, G. 1997. Effects of elevated CO₂ and temperature on photosynthesis and rubisco in rice and soybean. Plant, Cell and Environment. 20(1):68-76.
89. Wilkerson, G. G.; Jones, J. W.; Boote, K. J.; Buol, G. S. 1989. Photoperiodically sensitive interval in time to flower of soybean. Crop Science. 29(3):721-726.