



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Estudio de estrategias de manejo del riego en maíz y soja

Federico Conrado Rovegno Arbiza

Magíster en Ciencias Agrarias
opción Ciencias Vegetales

noviembre 2021

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Dr. Ing. Agr. Claudio García, Ing. Agr. (PhD) Oswaldo Ernst, Ing. Agr. MSc. Álvaro Otero, el 4 de noviembre del 2021.
Autor: Federico Conrado Rovegno Arbiza. Director: Dr. Ing. Agr. Luis Ángel Giménez.

Dedico este trabajo a la familia Ferraz Rottini por su apoyo durante mi estadía en Paysandú, especialmente a Cicerón Ferraz por ser un ejemplo a nunca bajar los brazos frente a cualquier adversidad. Una de las mejores cosas que me regaló esta maestría fue conocer su familia, que la quiero como si fuera la mía.

Gracias

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor de tesis Dr. Ing. Agr. Luis Giménez por permitirme desarrollar este trabajo, por su constante apoyo durante el mismo y su paciencia. A Isabel Sans y todo el personal de posgrado por su colaboración durante la realización del presente trabajo.

A Richard Arévalo, Andrés Ferraz, Juan Mosqueira, Alejandro Akerman, Nicolás Cortazzo, Gastón Sebben, Nicolás Caram, Felipe Casalás y Laura Barreto por su colaboración y disposición en el trabajo de campo, y su colaboración en materiales.

A Unicampo y su equipo de trabajo, por su paciencia y su apoyo en el último tramo de la maestría. A Oswaldo Ernst y Sebastián Mazzilli por su paciencia y apoyo durante toda la maestría.

Especialmente a mi familia, a mi madre por su apoyo incondicional en todo, un pilar en mi vida, a mi padre que seguramente desde donde este estará orgulloso de todo lo logrado, hermanas, sobrino y cuñado, a mi familia del sacra y mis amigos de siempre junto a sus familias, por el constante apoyo y por estar siempre tanto en las buenas como en las malas, gracias a todos ellos esto es posible.

A la familia Cortazzo, Ferraz Rottini, Ferraz Chucarro y Bartaburu Debali, por su constante apoyo en una ciudad de la cual no soy oriundo pero quiero mucho. Especialmente a Victoria Bartaburu por ser incondicional durante todos estos años.

A todos aquellos compañeros y amigos que conocí a lo largo de la maestría, quienes quedan en mi recuerdo, junto a todas las experiencias vividas.

TABLA DE CONTENIDO

	página
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN	VIII
SUMMARY	IX
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1. HIPÓTESIS DE TRABAJO	2
1.2. OBJETIVO GENERAL	3
1.2.1. <u>Objetivos específicos</u>	3
1.3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ANTECEDENTES	4
1.3.1. <u>Situación de la producción nacional de soja y maíz</u>	4
1.3.2. <u>Determinación de rendimiento en grano</u>	7
1.3.3. <u>Respuesta al estrés hídrico en soja</u>	12
1.3.3.1. Estrés hídrico en etapa vegetativa.	14
1.3.3.2. Estrés hídrico en etapa reproductiva.	15
1.3.4. <u>Respuesta al estrés hídrico en maíz</u>	17
1.3.4.1. Estrés hídrico en etapa vegetativa.	18
1.3.4.2. Estrés hídrico en etapa reproductiva	19
1.3.5. <u>Demanda de agua de los cultivos</u>	21
1.3.5.1. Exigencias de agua de soja	23
1.3.5.2. Exigencias de agua de maíz	24
1.3.6. <u>Estrategias de riego</u>	25
1.3.6.1. Respuestas al riego en soja	27
1.3.6.2. Respuesta al riego en maíz	30
1.3.7. <u>Riego deficitario</u>	31
1.3.7.1. Riego deficitario en soja	34

1.3.7.2.	Riego deficitario en maíz	36
2.	<u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	39
2.1.	MANEJO EXPERIMENTAL.....	39
2.2.	INSTALACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE RIEGO.....	42
2.3.	MEDICIONES REALIZADAS	44
3.	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	49
3.1.	CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA	49
3.2.	FENOLOGÍA DE LOS CULTIVOS	51
3.3.	DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL SUELO.....	53
3.3.1	<u>Evolución del agua disponible en el suelo</u>	57
3.4.	HUMEDAD DEL SUELO.....	60
3.5.	CARACTERIZACIÓN DEL AGUA EN EL SUELO ESTIMADO A TRAVÉS DEL MODELO SIMDUALKC.....	66
3.5.1.	<u>Transpiración</u>	66
3.5.1.1.	Maíz.....	66
3.5.1.2.	Soja.....	69
3.5.2.	<u>Pérdidas de agua en el suelo por percolación, escurrimiento, y evaporación</u>	72
3.5.2.1.	Maíz.....	72
3.5.2.2.	Soja.....	81
3.6.	DEMANDA DE AGUA DEL CULTIVO Y EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR	89
3.6.1.	<u>Maíz</u>	89
3.6.2.	<u>Soja</u>	93
3.7.	RADIACIÓN INTERCEPTADA Y PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA.....	97
3.7.1.	<u>Maíz</u>	97
3.7.2.	<u>Soja</u>	101
3.8.	EFICIENCIA DE USO DE LA RADIACIÓN	105
3.8.1.	<u>Maíz</u>	105

3.8.2.	<u>Soja</u>	107
3.9.	RENDIMIENTO EN GRANO, COMPONENTES Y SUB-COMPONENTES DEL RENDIMIENTO	108
3.9.1.	<u>Maíz</u>	108
3.9.2.	<u>Soja</u>	115
3.10.	EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA EN MAÍZ Y SOJA.....	122
4.	<u>CONCLUSIONES</u>	125
5.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	128

RESUMEN

La estrategia de riego suplementario de cultivos agrícolas mayoritariamente utilizada hasta el presente ha sido regar con volúmenes de agua suficientes para satisfacer completamente la ETc, denominada riego total (RT). Esta estrategia es cuestionada sobre todo en regiones en las que el agua es escasa, básicamente por los grandes volúmenes requeridos y los efectos negativos que provoca sobre el medio ambiente. En ese sentido, para mejorar la adopción de esta tecnología importa generar mayor información sobre estrategias de riego alternativas de manera de ahorrar agua y mejorar la eficiencia de uso del agua (EUA). Es por ello que surge la necesidad de estudiar los efectos de otras estrategias de manejo del agua como: el riego deficitario (RD) y el riego deficitario controlado (RDC), basados en una menor utilización de agua. El objetivo principal del trabajo fue estudiar la respuesta productiva de maíz y soja frente a distintas estrategias de riego y proponer alternativas al RT que permitan mejorar la EUA. Para ello se planificó evaluar el RT durante todo el ciclo del cultivo, tres estrategias de RDC en diferentes etapas de desarrollo y una estrategia de RD a 50% de RT. En maíz, la estrategia que logró los mayores rendimientos fue el RT, asimismo el RDC en el periodo crítico y llenado de granos y el RD lograron los rendimientos más próximos al RT. Se identificó, una mayor sensibilidad al estrés hídrico en la etapa de llenado de granos en comparación con la etapa vegetativa. En soja, el RDC durante la etapa vegetativa y el periodo crítico y el RD, alcanzaron rendimientos similares al RT, en las cuales se constató un ahorro de agua de 103 y 150 mm, respectivamente. En ambos cultivos, ninguna de las estrategias de riego sub-óptimo evaluadas logró aumentar la EUA en relación al RT.

Palabras Clave: agua, cultivos, déficit hídrico, riego deficitario, riego deficitario controlado

CONTROLLED DEFICIT IRRIGATION OF MAIZE AND SOYBEAN

SUMMARY

The strategy of supplementary irrigation of agricultural crops majority, until the present, called total irrigation (TI), has been irrigated with sufficient volumes of water to fully satisfy the ETC. This strategy is questioned especially in regions where water is scarce, basically because of the large volumes required and the negative effects it causes on the environment. To improve the adoption of this technology it is crucial to generate more information on alternative irrigation strategies in order to save water and improve water use efficiency (WUE). This is why the need to study the effects of other water management strategies such as: deficit irrigation (DI) and controlled deficit irrigation (CDI), based on lower water use. The main objective of this work was to study the productive response of corn and soybeans against different irrigation strategies and propose alternatives to TI that allow improving the WUE. To do this, it was planned to evaluate the TI throughout the crop cycle, three CDI strategies at different stages of development and one DI strategy at 50% of TI. In corn, the strategy that achieved the maximum yields was TI, also CDI in the critical period and grain filling and DI, achieved yields closest to the TI. Increased sensitivity to water stress was identified in grain filling stage compared to vegetative stage. In soybeans, CDI during vegetative stage and critical period and DI, reached yields similar to TI, water savings of 103 and 105 mm were found, respectively. In both crops, none of the sub-optimal irrigation strategies evaluated managed to increase the WUE in relation to TI.

Keywords: water, crops, deficit irrigation , controlled deficit irrigation

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura es el mayor consumidor mundial de agua dulce, con más del 60% del agua dedicada al riego de cultivos (Wada y Bierkens, 2014). El riego suplementario es una herramienta poderosa que permite alcanzar rendimientos potenciales y mantener la productividad interanual de los cultivos, siempre que no haya otros factores limitantes. Es posible a través del riego atenuar las crisis en años de sequía y estabilizar e incrementar la producción por unidad de área (Giménez 2012, Steduto et al. 2012, Agorio et al. 1988, Henry 1973). Sin embargo, se debe aumentar la eficiencia del riego para producir más alimentos con menos agua para satisfacer las futuras demandas alimenticias (Smidt et al., 2016).

El uso de riego suplementario en maíz y soja permite triplicar el rendimiento promedio obtenido en secano (MGAP-DIEA 2017, Capurro 2016, Giménez 2014). La respuesta productiva al riego se debe a la baja capacidad de almacenaje de agua de los suelos (Molfino y Califra, 2001) en relación a las necesidades hídricas de los cultivos, a la variabilidad del régimen de lluvias y a las elevadas demandas atmosféricas del verano (Giménez et al., 2010).

Según Fereres y Soriano (2007) la estrategia general de riego ha sido la de regar con agua suficiente para satisfacer completamente la evapotranspiración (ET), denominada riego total (RT). Este enfoque, es cuestionado sobre todo en regiones donde el agua es escasa, por las grandes cantidades de agua requeridas para riego y los efectos negativos que esto tiene sobre la naturaleza. Es por estas razones, que según dichos autores es necesario un cambio en la gestión del riego.

Rosadi et al. (2005), aseguran que la competencia por el uso de agua con otros sectores forzarán a operar el riego en condiciones de agua restringida. La dependencia del agua para altas producciones está aumentando y continuará en ese sentido debido a la disminución de los recursos hídricos y al aumento de la temperatura debido al cambio climático global. En consecuencia, para garantizar la

sostenibilidad de los recursos hídricos y optimizar el uso del agua en la producción de cultivos se deben desarrollar e implementar nuevas estrategias de riego (Bui, 2017).

Del mismo modo Giménez (2012), asegura que para mejorar la adopción de esta tecnología es preciso generar mayor información de manera de lograr superar los costos e inversiones que implica y además realizar un uso eficiente del agua de riego. Es por ello que surgió como alternativa a la tecnología del RT, el riego deficitario (RD) basado en someter a los cultivos a déficit hídrico a lo largo de su ciclo, mediante la aplicación de volúmenes de agua por debajo de las necesidades hídricas totales mejorando la utilización del uso de agua por los cultivos.

Otra alternativa es el riego deficitario controlado (RDC) basado en reducir los aportes de agua en aquellos períodos fenológicos en los que el déficit hídrico no afecta sensiblemente a la producción y calidad de cosecha, como puede ser la etapa vegetativa (V) y la floración (FL) en soja y la etapa V y llenado de granos (LLG) en maíz, para luego cubrir plenamente la demanda durante el resto del ciclo (Capurro et al. 2017, Torrión et al. 2014, Fereres y Soriano 2007, Rosadi et al. 2005, English 1990).

Se requiere generar conocimientos sobre posibles manejos del riego, dadas las diferencias en el potencial de producción de los cultivos y las eficiencias en la utilización del agua (EUA). El avance en el conocimiento de estos aspectos permitirá realizar evaluaciones sólidas de la incorporación de diferentes estrategias de riego suplementario en maíz y soja.

1.1. HIPÓTESIS DE TRABAJO

En maíz, las estrategias de RDC en el periodo crítico (PC), RDC en la etapa V y PC, RDC en el PC y LLG, y el RD al 50% de lo aplicado en RT (RD), permiten mejorar la

EUA sin pérdidas significativas de rendimientos en comparación a los obtenidos con RT durante todo el ciclo.

En soja el RDC en PC, RDC en etapa V y PC, RDC en FL y PC, y RD, permiten mejorar la EUA sin pérdidas significativas de rendimiento en comparación a los obtenidos con RT.

1.2. **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar estrategias de RD y RDC en maíz y soja que permitan mejorar la EUA y obtener rendimientos iguales a los logrados con RT.

1.2.1. **Objetivos específicos**

1. Determinar la EUA de las estrategias de RD y RDC en comparación con RT, en maíz y soja.

2. Evaluar la producción de materia seca (MS) y componentes principales del rendimiento en maíz y soja en estrategias de RDC en diferentes etapas de desarrollo y RD en relación al RT.

3. Estudiar los efectos de utilizar estrategias de RDC y RD sobre el IAF y la intercepción radiación fotosintéticamente activa en maíz y soja, para permitir interpretar las respuestas de producción de MS y rendimiento en grano, para avanzar en el entendimiento de los efectos de diferentes disponibilidades hídricas en los cultivos en estudio.

4. Estimar la percolación, el escurrimiento, la evaporación y la transpiración, a través del modelo SimDual Kc en diferentes estrategias de RT, RDC y RD en maíz y soja.

1.3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ANTECEDENTES

1.3.1. Situación de la producción nacional de soja y maíz

El sector agropecuario cumple un rol destacado en el desempeño de la economía nacional representando un 7% del PBI, constituyendo una de las actividades de mayor importancia para el país (MGAP-DIEA, 2017).

La soja en la zafra 2015-16 obtuvo una producción de 2,2 millones de toneladas a nivel nacional, significando una disminución del 29% con respecto a la zafra 2014-15, y con un rendimiento promedio de $1.937 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, es decir un 20% inferior al rendimiento del ciclo anterior. La disminución del rendimiento fue producto de deficiencias hídricas producidas en enero y excesos hídricos del mes de abril (MGAP-DIEA, 2016). En la zafra 2016-17 se cosecharon 3,3 millones de toneladas, esta cifra fue 49% superior a la obtenida en la zafra 2015-16, alcanzando un rendimiento de $3.026 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, que representa un incremento del 56% en relación a la zafra anterior, constituyendo la temporada 2016-17 la que logró el mayor rendimiento de soja registrado en el Uruguay (MGAP-DIEA, 2017).

En el caso del maíz, los rendimientos promedios nacionales de la zafra 2016-17 se estimaron en $7.136 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, logrando un incremento de 21% con respecto a la zafra anterior, constituyendo los máximos rendimientos promedios registrados a nivel nacional por las buenas condiciones hídricas de esta zafra (MGAP-DIEA, 2017).

El área bajo riego de soja y maíz fue de 16.783 mil hectáreas en la zafra 2016-17. El área regada de maíz se estimó en 7.784 hectáreas, un 24% menos que en la zafra 2015-16, como consecuencia de las condiciones climáticas favorables antes mencionadas. El rendimiento promedio bajo riego fue de $9.711 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, un 13,6% superior al rendimiento obtenido en la zafra anterior y un 27% mayor al rendimiento de maíz de secano.

La superficie de soja regada fue estimada en casi 9.000 hectáreas (0,8% del total sembrado), con un rendimiento promedio de 3.493 kg.ha⁻¹, un 18,4% por encima del rendimiento medio del cultivo de secano.

Uruguay se caracteriza por tener un clima templado sub-húmedo (Castaño et al. 2011, Agorio et al. 1988). Las precipitaciones (PP) medias anuales acumuladas varían entre 1200 y 1600 mm con una alta variabilidad interanual. La evapotranspiración del cultivo de referencia (Penman-Monteith) (ET_o) presenta un claro comportamiento estacional registrando los valores más altos en verano y más bajos en invierno. La ET_o anual acumulada varía entre 1000 y 1200 mm, con una baja variabilidad interanual (Castaño et al., 2011).

En los suelos del Uruguay predominan grandes áreas de Molisoles cuyas características son la presencia de un horizonte superficial oscuro, bien estructurado en condiciones naturales, con dominancia de arcillas de carga permanente y ricos en materia orgánica. Además, es importante destacar la presencia generalizada de horizontes sub-superficiales de textura fina y de carácter iluvial a escasa profundidad (Durán et al., 1999). La capacidad de almacenaje de agua disponible (CAAD) del suelo cumple el rol de reservorio de agua para el crecimiento de los cultivos y es el regulador del ciclo hidrológico de los mismos (García Petillo et al., 2013). Molfino y Califra (2001) destacan que aproximadamente un 30% de la superficie del país posee tierras con CAAD entre 40-80 mm mientras que el resto del territorio entre 80-160 mm. Esta última cubren aproximadamente entre un 25 a 33% de los requerimientos de un cultivo de maíz o soja de alto potencial (Sawchik et al., 2010).

Asimismo, Giménez y García (2011) indican que en la región agrícola del Litoral Sur las deficiencias de agua promedio en relación a las necesidades hídricas se sitúan en el entorno de 37% para maíz y 35% en soja, siendo dichos cultivos los que presentan mayor diferencia entre la evapotranspiración real y de cultivo.

Por lo expuesto anteriormente, se producen períodos de deficiencias hídricas, especialmente desde diciembre a marzo y en suelos superficiales el período se extiende desde octubre hasta abril (Henry, 1973). El agua y su disponibilidad son los factores que explican principalmente la variabilidad de los rendimientos entre años (Giménez y García 2011, Sawchik y Ceretta 2005, Andersen et al. 2001). El impacto en el rendimiento debido al estrés hídrico es la principal limitante de producción de los cultivos estivales en Uruguay (Sawchik y Ceretta, 2005).

De acuerdo a estudios realizados por Henry (1973) en el Uruguay ocurren períodos de déficit hídrico en el suelo, incluso en años normales en cuanto a lluvia (años promedio). Según un análisis realizado por Giménez y García (2011) utilizando modelación con una amplia serie climática, encontraron que en la mayoría de los años ocurren deficiencias hídricas para soja y maíz, encontrando deficiencias máximas de hasta 470 mm y 308 mm, respectivamente.

Baigorri et al. (2009), mencionan que el agua se encuentra entre los factores abióticos no controlables de mayor importancia involucrados en la producción. El estrés hídrico, es considerado a nivel mundial como el factor más importante en limitar el crecimiento y el rendimiento de las plantas (Boyer, 1982).

El riego suplementario puede ser una herramienta poderosa que permite alcanzar rendimientos potenciales y mantener la productividad, siempre que no haya otros factores limitantes atenuando las crisis en años de sequía y estabilizando e incrementando la producción por unidad de área (Gadédjisso-Tossou et al. 2018, Giménez 2012, Steduto et al. 2012, Agorio et al. 1988, Henry 1973). Esto se transmite directamente en una creciente estabilidad de los ingresos, contribuyendo a reducir la incertidumbre a la que se expone el productor agropecuario en el proceso de toma de decisiones. En términos generales ello contribuye a la mayor inversión e incorporación de innovación y tecnología (MGAP-DIEA, 2015).

El rendimiento promedio de los cultivos de maíz y soja con riego en establecimientos agrícolas comerciales muestra un incremento significativo en relación al rendimiento obtenido en secano. En el caso de la soja, el aumento fue de 1.395 y 1.541 kg.ha⁻¹ para soja de primera y segunda, respectivamente. Mientras que en maíz generó 3.709 kg.ha⁻¹ adicionales en promedio (MGAP-DIEA, 2020). Asimismo, a nivel experimental el uso de riego en ambos cultivos permitió triplicar el rendimiento promedio obtenido en secano (Capurro 2016, Giménez 2014, MGAP-DIEA, 2017). Se han reportado rendimientos potenciales en soja mayores a 7000 Kg ha⁻¹ (Giménez, 2014) y en el caso de maíz los rendimientos máximos promedio reportados por Giménez (2012) variaron entre 13500 y 15300 kg.ha⁻¹, Carter y Petrella (2013), Callero (2014) lograron rendimientos aproximados a 14000 kg.ha⁻¹. Mientras que Trout y DeJonge (2017) reportaron rendimientos de 11.170 a 13.640 kg.ha⁻¹ en el noreste de Greeley (EE.UU.) en cuatro años de investigación.

1.3.2. **Determinación de rendimiento en grano**

El rendimiento de los cultivos es el resultado de múltiples interacciones entre la genética y el ambiente en el que se desarrollan y crecen (Kantolic et al. 2003). La producción tiene por objetivo la cosecha de una parte de la biomasa producida durante el crecimiento, la misma es el resultado final de la captura de recursos (CO₂, agua y nutrientes), la cual tiene como principal fuerza motriz a la radiación solar, a través de la participación en los procesos de fotosíntesis y transpiración (Baigorri et al. 2009, Otegui 2009).

Bajo un manejo establecido y en un ambiente determinado, el rendimiento de un cultivo puede ser explicado como una función directa de la producción de biomasa total (BT) y el índice de cosecha (IC). Un conjunto de factores interactúan simultáneamente en la producción de biomasa como: i) la radiación solar incidente (Ri) inherente a la disponibilidad del área geográfica y estación del año, ii) la eficiencia de intercepción (ei) determinada por la capacidad del canopeo para

capturar la R_i y iii) la eficiencia de conversión o de uso de radiación (EUR) (Andrade, 1995). La cantidad de radiación solar que se acumule dependerá de la longitud del ciclo del cultivo y de la dinámica con que este capture dicha radiación.

El índice de área foliar (IAF) se genera con la aparición y expansión de las hojas, y es producto del número de hojas y del tamaño de las mismas (Andrade et al., 2000). El tamaño de las hojas depende de la duración y de la tasa de expansión foliar. La temperatura modifica el IAF ya que actúa en función directa sobre la tasa de expansión y en función inversa sobre la duración foliar. La interceptación de radiación solar depende del momento en el ciclo del cultivo y del valor de IAF logrado, el cual debe permitir interceptar la mayor proporción de radiación incidente y durante el mayor tiempo posible (Cárcova et al., 2003).

El maíz como consecuencia principal de la estructura de su canopia posee un coeficiente de extinción (ángulo que presentan las hojas con respecto a la vertical del suelo) más bajo con respecto a la soja, por lo que necesita más área foliar para interceptar la misma proporción de radiación incidente, obteniendo un mayor valor de IAF crítico (intercepción del 95% de la radiación incidente). En contra partida, las hojas más planófilas como las de soja obtienen una distribución de la radiación desfavorable en el perfil de la planta con respecto a hojas más erectófilas como las del maíz, obteniendo una distribución más pareja de la radiación en su perfil de planta (Andrade et al., 2000).

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

la de carbohidratos (Cárcova et al., 2003). Andrade et al. (2000) han realizado experimentos observando que se necesitó 1,39 y 1,93 g de glucosa para producir 1 g de granos de maíz y soja, respectivamente, producto de la composición interna de los granos. El maíz posee un alto contenido de carbohidratos (85% aprox.) mientras que el grano de soja contiene un elevado porcentaje de proteína (36% aprox.) y de aceite (19% aprox.) siendo más costoso energéticamente su producción, este es uno de los principales motivos que provoca que el maíz más eficiente en conversión de energía a biomasa.

La generación del rendimiento de un cultivo es un proceso complejo y se produce en diferentes etapas del ciclo, de acuerdo al aporte que van realizando distintas estructuras del cultivo. En ese marco de análisis, es posible concebir al rendimiento como un conjunto de componentes que se van generando durante el desarrollo del cultivo, quedando cada uno de ellos fijado en determinado momento del ciclo (Cárcova et al., 2003).

El rendimiento es una variable muy compleja, puede subdividirse para su análisis en dos componentes principales: el número de granos por unidad de superficie y el peso de los granos. Si bien existen compensaciones entre ellos, estos componentes guardan entre sí una cierta independencia que permite suponer que un aumento en cualquiera de los dos puede producir un aumento en el rendimiento. Sin embargo, en un rango amplio de condiciones agronómicas el número de granos por unidad de superficie es el componente que mejor explica las variaciones en el rendimiento. De este modo, identificar cuál es el PC para la definición del número de granos por metro cuadrado permite identificar con cierta precisión cuáles serían las acciones más efectivas para lograr mejoras del rendimiento, a pesar que exista una proporción no predecible de cambios asociados con el peso medio de las semillas (Kantolic y Satorre, 2004).

La sensibilidad ante modificaciones de la relación fuente-fosa es diferente entre los componentes. Esto ha llevado a definir al PC de determinación del rendimiento como aquella etapa del ciclo de los cultivos en la que las disminuciones en la tasa de crecimiento del cultivo inciden más que en otras etapas, y explican en mayor medida las variaciones del rendimiento. Por tanto, el PC coincide con la etapa en que se determina el principal componente numérico del rendimiento, que es el número de granos por unidad de superficie (Prieto Angueira et al. 2013, Cárcova et al. 2003). El estado fisiológico alrededor de FL determina el número de granos fijados en maíz (Andrioli y Sentelhas 2009, Sadras et al. 2000, Andrade et al. 1996), las plantas de maíz tienen crecimiento determinado y por lo tanto, baja plasticidad, lo que le confiere al cultivo baja estabilidad de producción de granos ante situaciones de estrés en FL. En soja, que es un cultivo de crecimiento indeterminado, la producción de granos es mucho menos afectada por el estado del cultivo en FL temprana, dependiendo más del estado del mismo en periodos reproductivos más avanzados (R4-R6, escala Fehr y Caviness 1977) (Andrade, 1995).

En maíz, la variación en la disponibilidad de recursos por planta no afecta en gran medida el potencial de flores por individuo considerando la primera y segunda espiga (Valentinuz, 1996). De esta manera, lo importante es la supervivencia de las espiguillas y granos ya que determinarán el número de granos por espiga, componente principal del rendimiento que está altamente correlacionado con la tasa de crecimiento por planta (TCP) alrededor de la floración. El aborto de las espiguillas o de los granos fecundados se produce hasta dos o tres semanas posteriores a la FL (Andrade et al., 1996). Por lo tanto, el número final de granos por individuo se determina en el entorno de la FL y está asociado a la tasa de crecimiento del cultivo en esa etapa (Vega et al., 2001).

Andrade et al. (1996), señalan que esta relación entre el número de granos y la TCP alrededor de FL es curvilínea, la cual presenta un umbral de 1 g.d^{-1} por debajo del cual no hay producción de grano, umbrales similares son reportados por

Borrás et al. (2007) entre 0,9 y 1,3 g.d⁻¹. El elevado umbral de crecimiento de planta requerido en maíz comparado con otros cultivos es debido a que la espiga es una fosa débil por ser una estructura axilar relegada en la planta; siendo objeto de una dominancia apical por parte de la panoja y el tallo en FL (Paliwal et al. 2009, Andrade et al. 2000).

En soja, en cambio, el número de granos por individuo se determina principalmente durante la fijación de vainas R3 a R6 y es función de la TCP durante esta etapa y solamente entre un 25-60% de las flores produce vainas y estas se vuelven prominentes una o dos semanas luego de que aparecen las flores, lo cual le da la capacidad de fijar estructuras reproductivas por un largo periodo (Wani et al., 2012). Por lo tanto, periodos de estrés concentrados durante la FL temprana producen menos efecto en la disminución de rendimiento que en maíz (Andrade et al., 2000).

La duración de las etapas críticas para la determinación del rendimiento debe ser considerada, en el caso del maíz básicamente es la temperatura la encargada de la regulación del ciclo, por lo tanto, expresar la tasa de crecimiento o la radiación interceptada por unidad de tiempo térmico mejora la predicción del número de granos fijados. En soja también se debe considerar el fotoperiodo ya que afecta la duración de las etapas de desarrollo (Cantagallo et al., 1997).

En soja, la dinámica de acumulación de materia seca en el grano es afectada por la disponibilidad de asimilados por planta durante la etapa de LLG. En la etapa lineal del llenado se define el rendimiento en este cultivo, cuanto mayor es la tasa de crecimiento del cultivo en este periodo y mayor la duración de esta etapa crítica, mayor es el rendimiento (Andrade y Ferreiro 1996, Andriani et al. 1991). El rendimiento de soja está generalmente limitado por la capacidad de la fuente fotosintética a partir de R4 (Egli et al., 1983). La etapa tres del LLG es a partir de la madurez fisiológica (MF), en la cual se corta la relación con la planta y cesa la

deposición de biomasa, esta etapa finaliza cuando se alcanza el máximo peso seco del grano. En general, la relación entre los componentes numéricos del rendimiento es negativa, ya que en la medida que se incrementa el número de granos por unidad de superficie tiende a disminuir el peso de grano (Capurro et al. 2017, Torrion et al. 2014, Andrade et al. 1996).

1.3.3. **Respuesta al estrés hídrico en soja**

El estrés hídrico es considerado a nivel mundial como el factor más importante en limitar el crecimiento y el rendimiento de las plantas (Gadédjisso-Tossou et al. 2018, Koech y Langat 2018, Prieto Angueira et al. 2013, Boyer 1982).

El agua es uno de los más importantes componentes de todos los organismos vivientes y específicamente en las plantas, es el principal constituyente, ya que representa 80% o más del peso de las plantas herbáceas. Además de ser una parte fundamental, constituye el medio de transporte de los nutrientes que provienen del suelo y en el proceso fotosintético el agua se combina con el dióxido de carbono para constituir la biomasa (Currié et al., 2006). El consumo mayor del agua, no es en la formación de los tejidos vegetales, sino en el proceso de transpiración. Se estima que en la mayoría de los cultivos, el agua evapotranspirada durante su desarrollo representa más del 95% del consumo de este elemento (Mbava et al., 2020).

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

El rendimiento en grano está estrechamente asociado con la transpiración y fijación del CO₂, es importante que el cultivo pueda capturar la mayor parte posible del recurso agua, utilizar el recurso capturado lo más eficientemente posible al intercambiarlo a nivel de estomas por el CO₂ destinado a producir fotoasimilados y convertir la mayor parte posible de los asimilados a órganos de cosecha (Dardanelli et al., 2003).

Según Andrade y Sadras (2000), el crecimiento es el resultado de la división y la expansión celular que se ve afectado por la ocurrencia de períodos de estrés hídrico mediante la reducción de la transpiración y la fotosíntesis. La caída de la tasa fotosintética, reduce la eficiencia de conversión de la radiación y la producción de granos.

De la misma forma, Santos (2009) y Wani et al. (2012), aseguran que el déficit hídrico afecta al crecimiento y rendimiento de soja a través de su acción sobre la fotosíntesis (economía del carbono) y la FBN (economía del N₂). En verano, al acentuarse el déficit hídrico en el suelo con el paso de los días sin lluvia, la fijación biológica cae antes que la fotosíntesis.

El suelo es el único reservorio de agua que dispone la planta; el volumen de suelo explorado por las raíces es el que determina la cantidad de agua potencialmente disponible para el cultivo (García y Ferrarotto, 2009). La capacidad de las raíces para extraer agua del suelo depende de la distribución y profundidad del sistema radical.

Desde el punto de vista del balance de agua, es muy importante conocer el crecimiento de las raíces en profundidad. A medida que la raíz profundiza va aumentando el volumen de suelo explorado, donde puede estar almacenada el agua. Las plantas de soja poseen una raíz principal muy desarrollada y engrosada en sus primeros centímetros y raíces secundarias más delgadas pero con una gran capacidad de profundización. Las raíces de los principales cultivos extensivos tienen

una gran capacidad exploratoria a través de todo el perfil de suelo, aunque la mayor densidad se encuentre en los primeros centímetros (García y Ferrarotto, 2009). Los mismos autores en ensayos a campo concluyeron que el déficit hídrico produce un incremento en la longitud del sistema radicular de las plantas pero con una menor superficie ocupada.

Del mismo modo Wani et al. (2012), mencionan que las raíces tienen un crecimiento localizado en los primeros 30-60 cm del suelo pero períodos prolongados de días secos inducen su crecimiento hacia capas inferiores del perfil del suelo. Al igual que para otros cultivos, el estrés hídrico aumenta la proporción de raíces y tiende a existir un crecimiento en el largo total de las mismas. Existen diferencias en el crecimiento de raíces según el genotipo. El desarrollo inicial de las raíces es rápido y suele notarse luego del comienzo de FL. Si bien la raíz pivotante puede alcanzar más de 1,5 m de profundidad y el cultivo podría extraer agua efectivamente de todo el perfil hasta 1,8 m, las raíces no tienden a penetrar horizontes del suelo moderadamente compactos.

La etapa de desarrollo en la que ocurren las deficiencias es determinante del rendimiento, porque a una misma intensidad y duración de la deficiencia, el efecto será diferente (García y Ferrarotto, 2009). Existen tres sub-períodos de importancia y con respuesta diferenciada a la ocurrencia de estrés hídrico. Estos son el período V, que va desde la emergencia a inicios de FL, el comprendido entre inicio de la FL e inicios de fructificación y el que corresponde mayoritariamente al LLG (Andriani, 2002).

1.3.3.1. Estrés hídrico en etapa vegetativa

Los cultivos son sensibles al déficit hídrico durante la germinación. Es necesaria una buena disponibilidad de agua (entre 15 a 50% de agotamiento del agua del suelo). El déficit en estas etapas puede tener un efecto muy negativo sobre el rendimiento del cultivo (Doorenbos y Kassam, 1990).

En trabajos realizados en soja que se evaluaron dos intensidades de deficiencia hídrica entre V4 y R1, se reportó que las únicas variables que fueron afectadas eran la longitud de los entrenudos y la altura de planta, dando lugar a una menor acumulación de MS (Desclaux et al., 2000). Esto concuerda con lo publicado por Karam et al. (2005) que indican que diferentes intensidades de déficits durante la etapa V no afectaron los componentes del rendimiento. Del mismo modo Andriani (2002) concluyó que los déficit hídricos de mediana intensidad (40-50% de agua útil en el suelo) provocados en el período de emergencia a FL (VE-R1) no producen reducciones en el rendimiento en la semilla, si bien pueden disminuir el área foliar y la altura de la planta. Sin embargo, mencionan que intensidades mayores de déficit hídricos (20-40% del agua útil en el suelo) podrían producir reducciones en el rendimiento en semillas en el orden del 10%.

1.3.3.2. Estrés hídrico en etapa reproductiva

En estudios realizados por Dardanelli et al. (1991) en soja, se sostienen que deficiencias de agua ocurridas durante la etapa reproductiva reducen significativamente la acumulación de MS por el cultivo, en cambio, el rendimiento en grano sólo se ve afectado cuando dichas deficiencias ocurren durante el periodo de LLG.

En estudios realizados por Giménez (2014), se indica que las deficiencias hídricas impuestas en el PC (R4-R6) provocaron disminuciones significativas en el rendimiento de soja. Se cuantificaron pérdidas de grano que variaron entre 44 y 50%. Las reducciones del rendimiento por deficiencias en las etapas no críticas (ENC) previas al PC fueron de 23%. El estrés hídrico durante el PC provocó menor acumulación de MS afectando negativamente la TCC en dicha etapa y el principal componente del rendimiento, es decir el número de granos por m². En las ENC las deficiencias provocaron disminuciones en la acumulación de MS sin afectar significativamente el número de granos. Así mismo, Monzon et al. (2021) aseguran

que el rendimiento de soja está generalmente limitado por la capacidad de la fuente fotosintética a partir de R4.

De la misma forma Karam et al. (2005) sostienen que la reducción en el área foliar y la acumulación de MS se da principalmente cuando el estrés hídrico ocurre durante R2, sin embargo la menor variación en la acumulación de MS ocurre en R5 y R7 en comparación con R2, lo que está indicando que pueden existir compensaciones cuando ocurre estrés hídrico temprano. En situaciones de baja disponibilidad de agua hasta R2 no se encontraron diferencias significativas en cuanto al rendimiento debido a dichos mecanismos de comparación lo que podría hacer posible que en áreas donde hay baja disponibilidad de recursos hídricos se suprima el riego previo a esta etapa.

El estrés hídrico durante la etapa R5, provoca una pequeña disminución en el peso de los granos, también se da una disminución significativa del rendimiento que esta dado principalmente por la reducción en el número de vainas y de granos por planta. El número de granos por superficie es el componente del rendimiento más sensible a un déficit hídrico durante la etapa de crecimiento de granos. El estrés en R7 puede provocar disminución en el peso de los granos pero a una tasa menor de la que puede darse en R5, pero no provoca disminuciones en el número de vainas ni granos por planta (Karam et al., 2005).

Asimismo Fehr y Caviness (1977) aseguran que las etapas del ciclo de mayor sensibilidad a la ocurrencia de deficiencias hídricas son las comprendidas entre la fructificación avanzada y el LLG, etapas entre R4 y R6, es decir el periodo más crítico de determinación del rendimiento. Esto se debe, a que durante estas etapas la capacidad de compensación del cultivo se ve reducida, debido a que al aborto floral por deficiencias hídricas se le agrega el de las vainas de menor tamaño, que son las estructuras reproductivas que presentan mayor susceptibilidad de abscisión (Giménez, 2014). En estudios realizados por Andriani (2002) induciendo

deficiencias hídricas entre R4 y R5.5 afectaron principalmente el número de granos por superficie y en estados posteriores disminuyen el peso de los granos.

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

1.3.4. **Respuesta al estrés hídrico en maíz**

El mayor rendimiento fotosintético del maíz que es una especie de tipo C4 resulta de los menores requerimientos hídricos para la producción de MS (Medrano et al., 2007). Sin embargo, esto no significa que las plantas con este mecanismo sean más tolerantes al estrés hídrico severo que las C3 sino que son más eficientes en el uso del agua (Benavides, 2005). El maíz al tener separados en la planta espacialmente los lugares de absorción de los de fijación de CO₂ provoca una tasa fotosintética neta muy superior que la que poseen las especies C3, especialmente ante déficit hídricos y condiciones de conductancia estomática baja (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

Fereres y Soriano (2007), reportaron una estrecha relación entre el agua consumida por el maíz y la producción obtenida. El déficit hídrico en cualquier momento del ciclo puede causar reducciones en el rendimiento dependiendo de la magnitud, pero particularmente en maíz, también depende del momento del ciclo en que ocurra.

Magalhães y Da Silva (1987) encuentran que el efecto de la falta de agua en la producción de grano es particularmente importante en tres estadios de desarrollo de maíz, a la iniciación floral, momento en que se determina el número potencial de granos, durante el periodo de fecundación, que es cuando se fija el potencial de

producción y en la etapa de LLG, que es cuando ocurre la acumulación de materia seca en los mismos.

1.3.4.1. Estrés hídrico en etapa vegetativa

Çakir (2004) realizó estudios sobre el efecto de déficit hídrico en distintas etapas del ciclo en maíz y encontró que la altura de la planta disminuye durante la etapa de rápido crecimiento vegetativo. Además, el IAF se reduce ante la presencia de estreses hídricos en las etapas de crecimiento vegetativo y panojamiento debido a un menor tamaño de las hojas.

Farré y Faci (2009) encontraron un menor consumo de agua en el perfil del suelo en los tratamientos donde el cultivo tuvo mayor déficit hídrico en la etapa V. Esto se debió a una deficiencia tan severa que hizo que el cultivo fuera incapaz de desarrollar un sistema radicular profundo. El efecto más importante del estrés hídrico en maíz es la reducción del crecimiento del cultivo. Los asimilados utilizados para el crecimiento provienen de la fijación fotosintética del CO₂ en los tejidos clorofílicos. La apertura estomática permite la difusión de CO₂ desde la atmósfera hacia la cámara sub-estomática para la posterior fijación como estructuras carbonadas. La disminución de la tasa de transpiración ante situaciones de déficit hídrico siempre va acompañada de una disminución en la absorción de CO₂ y por lo tanto de la fotosíntesis (Azcón- Bieto y Talón, 2008). Pero además de una inhibición del crecimiento el déficit hídrico modifica la evolución fenológica del cultivo, su morfología como grandes aumentos en la relación parte aérea/raíz (Della Maggiora et al., 2000).

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

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

1.3.4.2. Estrés hídrico en etapa reproductiva

El rendimiento se reduce ante el estrés hídrico en cualquier etapa del cultivo, pero el efecto más grave es durante las etapas reproductivas (Payero et al., 2009). Diversos autores (Comas et al. 2019, Çakir 2004, Andrade et al. 1996, NeSmith y Ritchie 1992) concuerdan en que el rendimiento de maíz es particularmente sensible a los déficits de agua que coinciden con el período FL masculina - FL femenina, causando reducciones notables en el número de granos y en el rendimiento.

Las deficiencias hídricas actúan sobre la cobertura del cultivo a través de la reducción en el crecimiento foliar, la aceleración de la senescencia y disminuye el área foliar activa. Esto reduce la proporción de radiación incidente interceptada afectando negativamente la producción de biomasa (Otegui et al., 1995). Asimismo, este estudio reportó que los granos.m⁻² y el rendimiento estuvieron relacionados con la ET durante el período entorno a FL femenina. Las deficiencias hídricas en dicha etapa resultaron en reducciones de 4,7 granos.m⁻² y 17,7 kg.ha⁻¹ por cada mm disminuido de ET.

Durante las etapas de formación de espiga y R3 (grano lechoso) de la escala fenológica de Ritchie y Hanway (1982) el estrés hídrico provocó pérdidas tempranas de las hojas inferiores por senescencia, disminución del peso seco y rendimiento en grano (Çakir, 2004). Esto ocurre como consecuencia de la menor radiación

interceptada siendo el peso de grano el componente más afectado (NeSmith y Ritchie, 1992).

Estudios realizados por Andrade y Gardiol (1995) identificaron que deficiencias hídricas en torno a la FL fueron las más perjudiciales para la producción de grano y detectan mermas del entorno de 50%. En el mismo sentido estos autores sugieren que el maíz no debe sufrir deficiencias hídricas durante el periodo comprendido entre V13-R3 para no afectar el número de granos, al igual que en la etapa de LLG (R3-R6) donde obtuvieron pérdidas importantes entorno de 20-40% de producción en grano.

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

En ese sentido, Payero et al. (2009) reportaron que el PC fue la etapa más sensible al déficit hídrico, ya que se redujo la producción de grano en 60% de casi 13000 kg.ha⁻¹ potenciales, por haber dispuesto solo de un 40% AD durante el mismo periodo. Asimismo, Çakir (2004) reportó que un corto déficit al comienzo del PC causó reducciones de 40% del rendimiento, mientras que deficiencias más prolongadas pueden llegar a disminuir hasta un 93% con respecto a no sufrir deficiencias hídricas. En trabajos en que se indujeron deficiencias constataron que

producto del déficit hídrico durante el PC se redujo la transpiración diaria del cultivo a $2,5 \text{ mm.día}^{-1}$ y se produjeron $3721 \text{ granos.m}^{-2}$ y un rendimiento de 8977 kg.ha^{-1} , mientras que el tratamiento sin déficit alcanzó los $5153 \text{ granos.m}^{-2}$ y kg.ha^{-1} (Della Maggiora et al., 2000).

Las deficiencias hídricas durante el LLG reducen la tasa fotosintética y aceleran la senescencia foliar, disminuyendo la asimilación total, presentando reducciones en el rendimiento en el entorno de 21 a 40% (Comas et al., 2019), estos autores concluyen que la importancia del estrés hídrico sobre el rendimiento en esta etapa depende de cuán temprano y severo sea dicho estrés.

El déficit durante el LLG reduce el peso de los mismos (Della Maggiora et al. 2000), por aumento de la senescencia y acortamiento de dicho periodo. En trabajos de Payero et al. (2009) las deficiencias de agua durante la etapa de LLG produjeron una reducción en el peso de los mismos de 26%, la que explicó la disminución del rendimiento de 29%.

1.3.5. **Demanda de agua de los cultivos**

La cantidad de agua disponible en el suelo determina la producción de biomasa en cualquier cultivo o comunidad vegetal; la producción de un gramo de biomasa implica el costo de determinada cantidad de agua (100 a 1000 g). El tipo de planta (mecanismo fotosintético C3 o C4) en conjunto con las condiciones ambientales determinará el valor exacto que se requiere para producirlo (Medrano et al., 2007).

El consumo de agua de los cultivos es el valor de la evapotranspiración acumulada en todo su ciclo, depende de la demanda atmosférica, de la duración del ciclo y del área foliar desarrollada por este. Casi toda el agua transpirada por un cultivo pasa a través de la superficie de sus hojas, de tal manera que a medida que aumenta el área foliar, aumenta linealmente el consumo de agua del cultivo para

una misma demanda atmosférica, hasta interceptar el cultivo el 95% de la radiación fotosintéticamente activa. A partir de ese valor por más que se incremente el área foliar el consumo de agua por transpiración se estabiliza y la evaporación se hace mínima (Gerster y Bacigaluppo, 2009).

Se denomina evapotranspiración (ET) a la pérdida continua de agua del suelo hacia la atmósfera, mediante la evaporación desde la superficie del cultivo o el suelo y la transpiración de la planta (García Petillo et al., 2012). Allen et al. (1998) señalan que la misma se encuentra afectada por varios factores climáticos tales como la radiación, humedad relativa del aire, temperatura y velocidad del viento.

Del mismo modo Pereira y Alves (2005), indican que las necesidades de agua de los cultivos son variables y corresponden a la evapotranspiración que presentan en el ambiente en el que se desarrollan y a la aplicación de la tecnología utilizada en cada situación productiva.

Allen et al. (1998) establecen que los cultivos bajo condiciones estándar para FAO presentan una ET que se denomina evapotranspiración del cultivo (ETc), considerando que el cultivo se encuentra bajo un manejo óptimo y que alcanza su rendimiento potencial. Los cultivos que crecen y se desarrollan bajo condiciones no estándar tienen una ET denominada por FAO como ETc ajustada (ETc aj) que en situaciones de campo es probable que sea menor que la ETc debido a diversas limitantes ambientales y de manejo y se le llama generalmente evapotranspiración real (ETr).

Del mismo modo Giménez y García (2011), mencionan que la ETr estima el consumo de agua de los cultivos que ocurre en las situaciones reales de campo en condiciones de secano. La misma se encuentra determinada principalmente por la demanda atmosférica, la ocurrencia de PP, la CAAD de los suelos y las características morfo-fisiológicas del cultivo.

Allen et al. (1998) hacen mención a que las necesidades de agua del cultivo refieren a la cantidad de agua que necesita ser proporcionada por el riego o lluvia, y la ETc se refiere a la cantidad de agua perdida hacia la atmósfera. La necesidad de riego es la diferencia entre necesidad de agua del cultivo y la lluvia efectiva.

1.3.5.1. Exigencias de agua de soja

Farias et al. (2007), aseguran que la disponibilidad hídrica durante el periodo de crecimiento de soja constituye la principal limitante para lograr el potencial de rendimiento siendo además la principal causa de las variaciones obtenidas entre años. La disponibilidad de agua es importante, principalmente en dos períodos de desarrollo de la soja; en la etapa germinación-emergencia y FL-LLG. Durante el primer período, tanto el exceso como la falta de agua son perjudiciales para el establecimiento del cultivo y la obtención de una buena uniformidad en la población de plantas, siendo el exceso hídrico más perjudicial que el déficit. Las necesidades de agua del cultivo van aumentando con el desarrollo del cultivo, alcanzando el máximo durante FL-LLG. La necesidad total de agua de soja para la obtención de rendimientos máximos varía de 450-800 mm, dependiendo de las condiciones climáticas, el manejo del cultivo y la duración del ciclo (Baigorri et al. 2009, Doorenbos y Kassam 1990).

Carballo de Silva (1990), indicó que la semilla de soja requiere el 50% de su peso en agua para germinar, lo cual la hace más exigente que la mayoría de los cultivos. El mismo autor indicó que en la etapa de plántula la demanda de agua es baja y el sistema radical es poco profundo, siendo las plantas totalmente dependientes de la humedad concentrada en los primeros centímetros de suelo, por lo cual una buena estrategia será humedecer solamente los primeros 20-30 cm de suelo. La etapa de rápido crecimiento vegetativo se refiere al período en que las plantas desarrollan activamente su follaje y sus raíces; sin embargo, aún para el

momento en que se inicia la FL, el sistema radical de la soja se encuentra en un 94% en los primeros 25 cm de suelo.

Karam et al. (2005), sostienen que el 65% de la ETc de soja ocurre durante la etapa de LLG, y además es el momento de mayor sensibilidad a un estrés hídrico.

Giménez y García (2011), obtuvieron mediciones de un amplio rango de ETc de soja en diferentes situaciones agroclimáticas de Uruguay, las cuales fueron de 455 a 836 mm y las ETc promedio variaron entre 463 y 641 mm. Las estimaciones de las ETr fueron sustancialmente menores que las ETc en la mayoría de las situaciones agro-climáticas planteadas y con una variabilidad entre años superior. Asimismo, se destacan los años «Niña» y «Niño» con los menores y mayores valores de ETr respectivamente. Baigorri et al. (2009) reportaron consumos de agua de 454 mm con máximos de 7,6 mm.día⁻¹ para Córdoba, Argentina.

Della Maggiora et al. (2000), evaluaron la evolución de la ETc en maíz, girasol y soja, encontrando que la soja presentó mayores valores de ETc, durante etapas iniciales y menores cuando alcanzó su máximo desarrollo, debido a que se siembra más tarde que los otros cultivos y esto la expone a una demanda atmosférica mayor en etapas iniciales. La ETc mantuvo valores cercanos a la ETo, salvo en el período comprendido entre R1-R6 donde fueron más altos.

1.3.5.2. Exigencias de agua de maíz

Andrade et al. (2000) señalan que para que ocurra la germinación en maíz las semillas deben absorber entre 30–40% de su peso en agua. Asimismo, Shaw (1988) menciona que con 10% de saturación de agua en suelo no se evidencia germinación, mientras que a medida que aumenta la humedad se incrementa la misma hasta llegar a 80% de saturación.

A partir del estado V6 hasta panojamiento, los requerimientos de agua y nutrientes se cuadruplican debido a una mayor actividad metabólica en planta y alargamiento de entrenudos en esta etapa. Los máximos requerimientos hídricos se manifiestan antes y durante la etapa reproductiva, decayendo hacia MF. Durante la etapa del PC, sin limitantes hídricas el consumo de agua representa entre 38 y 40% del total de agua consumida, seguido de la etapa LLG y la V (Giménez, 2012).

Fassio et al. (1998) determinaron que el maíz requiere transpirar entre 450-600 mm para obtener rendimientos potenciales. Cardellino y Baethgen (2000) utilizando el modelo de CERES Maize analizando una serie de más de 30 años encontraron que en Colonia Uruguay los valores de ETc diarios frecuentemente oscilan entre 5,75 mm y 6,25 mm demandando riegos entre 150 a 280 mm.

Giménez y García (2011) reportaron valores de ETc en el rango de 536-672 mm en el norte y sur del Uruguay. Çakir (2004) en Turquía, obtuvo resultados de evapotranspiración de maíz sin limitantes entre 700 y 800 mm. En Balcarce y Pergamino, Argentina, sin limitantes hídricas y nutricionales, diferentes autores obtuvieron valores de evapotranspiración entre 500 y 600 mm (Andrade y Gardiol 1995). En regiones templadas, los cultivos sembrados en fechas tempranas alcanzan una mayor ETc acumulada, debido a la mayor duración del ciclo de crecimiento y a una mayor ET durante el período de LLG (Andrade et al., 1996).

1.3.6. **Estrategias de riego**

La escasa adopción del riego en maíz y soja a nivel comercial, se debe a varios factores, entre los que se destacan, los elevados costos e inversiones de la tecnología, la ausencia de fuentes de agua en la región donde se realizan mayoritariamente los cultivos y la falta de conocimientos en riego de técnicos y productores (Giménez, 2017).

En sistemas de producción bajo riego, es de gran importancia conocer el volumen de agua que consume un cultivo en su ciclo para programar las actividades de riego. Además, en condiciones de riego suplementario es necesario conocer el consumo diario de cada cultivo, para determinar las necesidades totales en cada momento del año, calculando la superposición de demanda de los cultivos intervinientes en el sistema productivo (Andriani, 2000).

El riego suplementario es una herramienta que en general aumenta la productividad y mejora la estabilidad del rendimiento de los cultivos, esto permite una mayor certidumbre económica en la agricultura (Vallone et al., 2011). La incorporación del riego a los sistemas productivos ayuda a ampliar el rango de gestión del riesgo y de esa manera aprovechar mejor las oportunidades sin aumentar la vulnerabilidad (Baethgen y Terra, 2010). En ese sentido, el riego es la tecnología que permite resolver las habituales deficiencias hídricas de los cultivos realizados en secano, permitiendo atenuar las crisis en años de sequía y estabilizar e incrementar la producción por unidad de área (FAO, 2017).

Según English et al. (2002), el enfoque de optimización es más complejo que el manejo convencional del riego. Este supone la necesidad de incorporar las funciones de producción de los cultivos de agua y funciones detalladas de costos. Gadédjisso-Tossou et al. (2018), aseguran que en las próximas décadas, el riego en la agricultura deberá producir más alimentos para una población mundial en expansión. Sin embargo, la creciente dependencia del riego coincidirá con la aceleración de la competencia por el agua por otros sectores y la creciente preocupación por los efectos ambientales del riego. Estas presiones convergentes obligarán a los regantes a reconsiderar las prácticas de riego convencionales.

Según Martin et al. (2011), el costo del riego está determinado por la cantidad de agua bombeada y el costo por unidad para aplicarla. Los costos de bombeo pueden disminuir con una adecuada programación del riego, buenas eficiencia de

aplicación y eficiencia del bombeo y disminuyendo en lo posible la presión requerida para el sistema de riego. Asimismo, existen demostraciones a campo en donde se redujo el riego en 38-50 mm solo con el monitoreo del contenido de agua en el suelo, debido a que permitió maximizar el uso del agua almacenada en el suelo y aprovechar mejor las lluvias.

La agricultura regada, tendrá que adoptar un nuevo paradigma en cuanto a la gestión, enfocándose en tener como objetivo la maximización de beneficios económicos, en lugar del objetivo de maximizar los rendimientos biológicos. Para esto, es necesario identificar estrategias óptimas de riego que requerirán modelos más detallados de las relaciones entre el agua aplicada y la producción de cultivos (English et al., 2002).

Según Fereres y Soriano (2007), el riego es el mayor consumidor de agua del mundo y la competencia de este por el uso de agua con otros sectores forzarán a operar el riego en condiciones de agua restringida.

1.3.6.1. Respuestas al riego en soja

La soja a nivel mundial, se realiza mayoritariamente en condiciones de secano, una de las razones que justifica esta situación productiva es la plasticidad de la especie en relación con la producción de biomasa y rendimiento. La soja aunque posee estas características morfo-fisiológicas indicadas, tiene diferencias genéticas y requerimientos ambientales que se deben considerar en relación a la concreción de la plasticidad del cultivo (Giménez, 2017).

La literatura registra un amplio rango de rendimientos máximos de soja con riego a nivel mundial que oscilan aproximadamente entre 4500 y 8600 kg.ha⁻¹ (Capurro et al. 2017, Setiyono et al. 2007, Cooper 2003, Lawn et al. 1984, Flannery 1983). Las variaciones detectadas en los rendimientos máximos son consecuencia de la diferente disponibilidad de radiación solar, nutrientes y agua, este último es el

factor más limitante por lo que el manejo del agua es un aspecto principal sobre el cual trabajar para disminuir las brechas de rendimiento en soja (Salvagiotti, 2009).

Rodríguez et al. (2012), evaluaron la respuesta en el rendimiento de soja al riego suplementario. Los resultados demostraron que existía respuesta significativa al agregado de agua en los componentes del rendimiento, observándose un mayor rendimiento en aquel tratamiento donde la oferta de agua fue mayor, también observando que el tratamiento que obtuvo mayor rendimiento registró un nivel de ETc muy superior al resto de los tratamientos. El número de granos por metro cuadrado se incrementó con el aumento de la lámina de riego aplicada, este incremento se asocia en un 96% con el incremento en el rendimiento logrado. Como consecuencia de ello, los tratamientos con mayor número de granos registraron un menor peso de los mismos en relación a los tratamientos en secano.

Zampedri y Currie (2000), concluyeron de acuerdo a un experimento donde se comparó el rendimiento de una parcela regada contra una parcela sin riego, que el aporte de riego aun en pequeñas dosis en momentos de estrés hídrico incide favorablemente sobre el rendimiento. En aquella parcela bajo riego, el rendimiento fue un 47,5% superior al testigo no regado. También se encontraron diferencias significativas en el número de plantas por metro lineal y en el número de nudos por planta a favor de la parcela regada.

Verneti (2002), realizó un estudio para evaluar el efecto del riego sobre el rendimiento de soja y sus componentes, a su vez se compararon diferentes modalidades de riego. Mediante el análisis de los diferentes subperíodos fenológicos se llegó a la conclusión de que no existen diferencias en la metodología de riego utilizada. Entre los ensayos bajo riego, no hubo diferencias significativas en cuanto a la altura de planta, sí se observaron diferencias al compararlos con los ensayos sin riego donde la altura de planta fue menor. El número de vainas y de granos por planta mostraron diferencias significativas con los sistemas sin riego, lo

mismo se observó en el rendimiento, no encontrándose diferencias entre los distintos sistemas de riego. En conclusión, la soja responde muy bien al riego pero no hay diferencias en cuanto al sistema de riego utilizado.

Musick et al. (1976), indican que los mejores rendimientos bajo riego se obtuvieron cuando se dejaba agotar hasta un 60% el agua útil del suelo en los primeros 60 cm del perfil, de esta forma no se registró un estrés visible en las plantas por lo que se consideró una forma de riego adecuada. Sin embargo, cuando se regó con 40% de agotamiento se redujo el rendimiento.

En estudios realizados para conocer el efecto del AD, en las diferentes etapas del ciclo del cultivo, se encontraron diferencias según Bidegain (2012), en el periodo siembra-R3 y R3-R6. Las situaciones en las que el AD desde la siembra a R3 fue mayor al 40% presentaron rendimientos significativamente mayores al mismo período con menos del 40% de AD. El mismo comportamiento se mostró cuando se analizó el periodo R3-R6 con un 60% del AD. Las PP durante el PC fueron determinantes del rendimiento, cuando se lograron más de 300 mm durante este período, los rendimientos superaron en un 70% el potencial. Los mayores rendimientos estuvieron asociados a disponibilidades mayores al 40% de AD durante el período siembra-R3 y mayores al 60% de AD para el período R3-R6.

De la misma forma Dardanelli et al. (2003) indican que el crecimiento y el consumo de agua se reducen cuando el contenido hídrico del suelo en la zona explorada por las raíces se encuentra por debajo del 40-60% del agua útil. Carballo de Silva (1990) indica que excesiva humedad al comienzo de la etapa reproductiva hace incrementar la altura de las plantas y puede producir vuelco, mientras que si el cultivo recibe agua en exceso al final de la etapa reproductiva se puede alargar el ciclo y desmejorar la calidad de las semillas.

1.3.6.2. Respuesta al riego en maíz

La producción de maíz desempeña un papel importante en el desarrollo económico y socioeconómico de muchos países. Al ser considerado como el tercer cultivo más importante del mundo, su contribución al desarrollo y la seguridad alimentaria se puede atribuir a sus usos diversificados: como producto básico de cereales, producto alimenticio y una fuente importante de bioetanol. Sin embargo, la producción de maíz se encuentra entre las mayores plantas de usuarios de agua, ya que su producción depende en gran medida del agua de riego (Bui, 2017).

Allen et al. (2006) establecen que un cultivo sin deficiencias hídricas (riego total o completo) es aquel que crece en un suelo donde el porcentaje de AD en la zona radicular nunca desciende más que la fracción de AD que puede ser agotada antes de presentar estrés hídrico (se reduce la ET), la cual se denomina factor de agotamiento (p). Para el caso del maíz el valor $p=0,55$; es decir que el AD en la zona radicular no puede descender por debajo del 45%. En este sentido Della Maggiora et al. (2000) constatan que la ETc se vio fuertemente afectada cuando el contenido de agua en el suelo desciende por debajo del 50% de AD. Rivetti (2006) en Córdoba, Argentina trabajó con niveles hídricos entre 40-60% de AD en el estado V, en LLG y durante ambas etapas. Los resultados obtenidos muestran que no hubo diferencias significativas ($p<0,05$) entre los tratamientos de riego.

Giménez (2012), señala que los rendimientos máximos promedio reportados en tres años (2009, 2010 y 2011) variaron entre 13500 y 15300 kg.ha⁻¹. Carter y Petrella (2013), Callero (2014) obtuvieron rendimientos de 14000 kg.ha⁻¹ aproximadamente, en estudios de evaluación de poblaciones con 80.000 y 100.000 pl.ha⁻¹, respectivamente. Las condiciones registradas en el trabajo de Carter y Petrella (2013) durante el PC mostraron altos niveles radiación solar y condiciones de baja PP que dio lugar a mayor cantidad de días con menor nubosidad. Sin embargo, para Callero (2014) en el PC las PP estuvieron concentradas en el mes de

diciembre mientras que en enero se registró una radiación solar mayor a la media. En tanto, Ceriani e Inella (2012) obtuvieron con una población de 90.000 pl.ha⁻¹ un rendimiento máximo promedio de 11200 kg.ha⁻¹. Estos autores estiman que la diferencia con el rendimiento potencial reportado por Giménez (2012) se debió a la falta de agua durante el PC.

Andrade et al. (1996), señalan que en condiciones sin limitantes hídricas ni nutricionales existe una respuesta positiva entre población y rendimiento. Salvagiotti (2009) reporta que sin las limitantes mencionadas las densidades óptimas recomendadas están entre 90.000 y 100.000 plantas.ha⁻¹ en cultivares de alto potencial. Giménez (2000), no menciona una densidad óptima ya que con 120 mil plantas y la mayor fertilización logró los rendimientos más altos. En contraposición, Rameau y Van Den Dorpel (2016), Carter y Petrella (2013), concluyen que la densidad óptima bajo riego está supeditada a la prolificidad del material genético y las características del ambiente de producción, estos últimos obtuvieron un rendimiento máximo de 14000 kg.ha⁻¹ utilizando poblaciones de 60000 pl.ha⁻¹ y 120000 pl.ha⁻¹.

1.3.7. **Riego deficitario**

La dependencia del agua para altas producciones de granos está aumentando y continuará aumentando debido a la disminución de los recursos hídricos principalmente atribuida al cambio climático. En consecuencia, para garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos y optimizar el uso del agua en la producción de cultivos irrigados para mantener su producción futura, se deben desarrollar e implementar nuevas estrategias (Bui, 2017).

En condiciones de fuentes de agua limitantes, el uso eficiente del agua puede ser alcanzado mediante el uso de nuevas técnicas de riego como programación del riego con riego deficitario (RD). El RD, debido a que reduce el uso del agua de riego,

ayudaría a hacer frente a estas situaciones donde el suministro de agua es restringido (Rosadi et al., 2005).

El RD es una herramienta para el manejo de los cultivos que se fundamenta en la estrategia de reducir el agua aplicada con el mínimo impacto sobre la producción (Fabeiro y López, 2005). La cual consta de la aplicación de agua por debajo de los requerimientos de ET por parte de los cultivos, el cual debe definirse de acuerdo al nivel de reposición de agua respecto a la máxima ET (English, 1990).

De la misma forma Kirda (2002) señala que el RD es una estrategia de riego que toma en cuenta las deficiencias hídricas para el cultivo y puede reducir la demanda evaporativa, haciendo así más eficiente el uso de los recursos hídricos.

Antes de implementar un programa de RD, es necesario conocer las respuestas de rendimiento de los cultivos al estrés hídrico, ya sea durante las etapas de crecimiento definidos o durante toda la temporada (Kirda, 2002).

Fabeiro y López (2005) señalan que el RD puede proporcionar retornos económicos por unidad de superficie, igual o superior que el riego para máximas producciones, lo que evidentemente indica eficiencia del agua también iguales o superiores. Bui (2017), menciona que el objetivo del agricultor regante debe ser maximizar el ingreso neto por unidad de agua utilizada en lugar de por unidad de tierra. La reducción del rendimiento resultante puede ser pequeña en comparación con los beneficios obtenidos a través de desviar el agua ahorrada para regar otros cultivos o para aumentar el área de riego del mismo cultivo o para bajar los costos del riego (Kirda, 2002). El RD ha sido ampliamente investigado como una estrategia de producción valiosa y sostenible principalmente en las regiones con escasez de agua. Los resultados de investigación confirman que el RD tiene éxito en el aumento de la productividad del agua para diversos cultivos sin causar severas reducciones de rendimiento (Rosadi et al., 2005).

Se puede lograr un aumento de la eficiencia de uso del agua si se considera la sensibilidad de las etapas de desarrollo del cultivo al estrés hídrico. En lugar de mantener el riego manteniendo un porcentaje de agotamiento de agua disponible (AD) constante, podría ser posible ajustar los riegos para hacerlos congruentes con las etapas sensibles al déficit hídrico (Torrión et al., 2014).

Los riegos deficitarios de alta frecuencia consisten en regar todo el ciclo por debajo de la demanda del cultivo pero utilizando una frecuencia de aportes suficientemente alta para evitar la aparición de situaciones de estrés trascendentes (Fabeiro y López, 2005).

Fabeiro y López (2005) señalan que el riego deficitario de alta frecuencia constituye una clara alternativa, pero no es menos cierto que presenta algunas limitantes importantes, como no considerar que el déficit hídrico puede resultar más o menos trascendente en función del momento fenológico. De esta manera, surge el riego deficitario controlado (RDC), basado en la idea de reducir los aportes de agua en aquellos períodos fenológicos en los que el déficit hídrico controlado no afecta sensiblemente a la producción y calidad de cosecha y, cubrir plenamente la demanda durante el resto del ciclo del cultivo. Al limitar las aplicaciones de riego en las etapas de crecimiento menos sensibles al déficit hídrico, esta práctica tiene como objetivo maximizar la productividad del agua y estabilizarla, en lugar de maximizar los rendimientos (Farré y Faci, 2009).

Fereres y Soriano (2007) mencionan que el riego deficitario debería de diseñarse de manera que el índice de cosecha se mantenga en su nivel máximo. Se ha encontrado que esto se consigue con riegos suficientes para producir al menos un 60% de la biomasa máxima; sin embargo, estos valores pueden cambiar según el cultivo y la variedad, entre otros.

Según Trout et al. (2010) para que el riego deficitario provea beneficios económicos a los productores, debe lograrse una mejora en la eficiencia del uso del

agua (EUA) por el cultivo que maximice el rendimiento de grano por cantidad de agua consumida. Esto coincide con Fereres y Soriano (2007), quienes aseguran que el principal objetivo no debería ser el de maximizar la producción por unidad de área sino por unidad de agua.

La productividad del agua, se define como el rendimiento o ingreso por unidad de agua usada en ET. La misma aumenta con el riego deficitario en relación al riego que satisfaga la demanda completa (Zwart y Bastiaansen, 2004). Esto se debe a que la relación entre la cantidad de agua y el rendimiento obtenido es lineal y positiva hasta un punto en donde la curva se convierte en curvilínea, porque parte del agua aplicada no se usa para ET y se pierde. El rendimiento llega a un máximo y las cantidades de agua adicionales no aumentan el rendimiento. En términos generales cuando el declive de los rendimientos es menor que la disminución de ET, la productividad del agua bajo ese tratamiento de déficit hídrico será mayor que el riego para máximos rendimientos (Fereres y Soriano 2007).

1.3.7.1. Riego deficitario en soja

En estudios de la programación del riego para la soja se ha demostrado que evitar el riego durante las etapas V podría resultar en rendimientos altos, como los obtenidos si el cultivo fuera regado durante toda la estación de crecimiento. Esto permitiría mejorar la EUA, debido principalmente a ahorrar riegos durante las etapas V, en las que la evaporación del suelo es la causa principal de la pérdida de agua (Neyshabouri y Hatfield, 1986).

Capurro et al. (2017) obtuvieron en ensayos de riego deficitario, satisfaciendo el 75% de la ETc durante todo el ciclo del cultivo, y el 50% de la ETc en etapa V para luego satisfacer el 100% de la ETc en etapa reproductiva, un ahorro del agua de riego de 24% y 50% respectivamente con respecto a la estrategia de satisfacer el 100% de la ETc durante todo su ciclo. A su vez, obtuvieron una respuesta del rendimiento al agua efectiva total que se comportó como un modelo lineal plateau,

con un máximo rendimiento de 5309 kg.ha⁻¹ y 584 mm de agua total efectiva, a partir de este valor no existieron e incrementos de rendimiento por riego.

Karam et al. (2005) muestran que durante la iniciación de vainas y fin de LLG la evapotranspiración acumulada fue de 299 mm, con un valor promedio de 5,9 mm por día. El promedio de evapotranspiración de la soja fue 5,5 mm por día durante todo la estación de crecimiento. En un estudio realizado en Balcarce, la EUA estimada para la soja fue de 9,1 Kg.mm⁻¹, este menor valor comparado con el encontrado en maíz de 18,1 Kg.mm⁻¹ es explicado por la baja eficiencia fotosintética y por la mayor concentración energética del grano de soja (Andrade et al., 2000).

Se reportan en la bibliografía EUA con valores del entorno de 5-6 Kg.mm⁻¹ (Clawson et al. 1986, Scott et al. 1987, Hattendorf et al. 1988, citados por Della Maggiora et al., 2000). En otros ensayos realizados Quaglieta Charandá y Mori, citados por Della Maggiora et al. (2000), reportaron una EUA de 11 Kg.mm⁻¹. Scott et al., citados por Sincik et al. (2008), reportaron que la EUA promedio en 5 años de evaluación fue de 6 Kg.mm⁻¹ cuando se regaba y aumento a 7,3 Kg.mm⁻¹ en secano.

Grasso y Montero (2011), en un experimento desarrollado en Uruguay, Paysandú, concluyeron que las deficiencias hídricas durante el PC provocan una disminución del rendimiento del 50%. El componente que se ve más afectado en esta situación fue el número de granos por por superficie el cual presentó una correlación de 0,98 con el rendimiento. Las diferencias entre el número de granos en los tratamientos con y sin riego se les atribuyen a la reducción en la TCC durante el PC debido a las deficiencias hídricas, por lo tanto, la baja disponibilidad de agua no solo afectó el rendimiento sino también la acumulación de MS.

Zampedri y Currie (2000), compararon soja con riego y en secano, se concluyó que el aporte del riego, aun en pequeñas dosis, en momentos de estrés hídrico

incide favorablemente sobre el rendimiento, el mismo fue 48% superior al testigo no regado.

1.3.7.2. Riego deficitario en maíz

El maíz en condiciones de estrés hídrico muestra un impacto en los factores de productividad, como el rendimiento, EUA, EUA de riego (EUAR) y los rendimientos económicos; el impacto es muy sensible a estrés localizado y las prácticas de gestión. El riego deficitario es una estrategia dirigida a obtener un rendimiento máximo con menos agua de riego y así lograr un rendimiento económico neto óptimo con recursos limitados (Bui, 2017).

Lamm et al. (1994) concuerdan que el maíz es una especie que posee alta sensibilidad al estrés hídrico y esto provoca que sea difícil implementar estrategias de manejo de riego diferentes a las que otorga el bienestar hídrico durante todo el ciclo, sin que ocurran pérdidas de rendimiento. Aydinsakir et al. (2013) obtuvieron que la respuesta de distintos genotipos de maíz al RD implicó disminuciones de rendimiento a medida que el riego aplicado fue reducido llegando a una reducción del 81%, respecto al riego total.

Sin embargo, Rivetti (2006) no obtuvo diferencias significativas en la producción de MS cuando se disminuyó el riego en las etapas V y LLG pero sí se manifestó una disminución del 15% de rendimiento cuando sólo se regó en el PC con respecto a riego total.

Asimismo, Farré y Faci (2009) obtuvieron que la biomasa aérea de maíz no se vio afectada cuando se aplicó RD desde la etapa de grano lechoso hasta MF. Por otro lado, señalan que el rendimiento fue reducido significativamente con RD desde la etapa de emergencia de los estigmas hasta la etapa de grano lechoso, producto del menor número de granos por superficie.

En un estudio desarrollado por Ko y Piccinni (2009) se evaluó el efecto de tres niveles de riego en el maíz donde los tratamientos fueron riego completo (donde se cubrió la ETc), riego medio (75% de la ETc) y riego mínimo (50% de la ETc). Se encontró que el riego mínimo rindió consistentemente menos que el riego completo y el riego medio, sin embargo, es posible regar al 75% del riego completo con una merma sólo del 10% del rendimiento y lograr mayores EUA. Dichos autores sostienen que la EUA disminuyó linealmente a medida que aumentó el agua que recibió el cultivo siendo la mayor EUA encontrada de $16 \text{ kg}\cdot\text{mm}^{-1}$. El-Hendawy et al. (2008) estudiaron el efecto de distintos regímenes de riego (1,0; 0,80 y 0,60 de la ETc) sobre los componentes del rendimiento de maíz y encontraron que tanto el número de granos, como el peso, no se vieron afectados por el tratamiento de 0,80 de ETc, pero en cambio a 0,60 de ETc produjo los menores valores en ambas variables.

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

Para Payero et al. (2009) es importante la cuantificación de la respuesta local de los cultivos al riego para la gestión del mismo, y reportan valores de EUA de 15,3 y $13,7 \text{ kg}\cdot\text{mm}^{-1}$. La cual aumentó de forma no lineal con la ETc estacional, haciéndose máxima en valores de ETc entre 600 y $700 \text{ mm}\cdot\text{ha}^{-1}$ alcanzando una EUA cercana a los $16 \text{ kg}\cdot\text{mm}^{-1}$. El rendimiento mostró el mismo comportamiento, la EUA fue máxima de $17 \text{ kg}\cdot\text{mm}^{-1}$ con rendimientos del entorno de $11.000 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Los resultados muestran que la EUAR y EUA tuvieron un comportamiento opuesto. Ertek y Kara (2013) reportaron similares valores quienes consideran que la EUA es un parámetro importante para el programa de riego, y encontraron que se hizo

máxima en tratamientos mantenidos a 70% de CC alcanzando EUA entre 31 y 48 kg.ha⁻¹ evapotranspirado durante todo el ciclo. Estos autores consideran que la EUAR se incrementó a medida que disminuyó el consumo de agua del cultivo.

En la etapa de crecimiento vegetativo, el RD podría emplearse como una estrategia de gestión del agua con un impacto limitado en el rendimiento. Se han obtenido EUA de riego de 30,9 y 21,4 kg.mm⁻¹ para RD impuesta solo en la etapa V, en comparación con 29,1 y 19,2 kg.mm⁻¹, bajo tratamiento de riego completo, indicado con una reducción de rendimiento de 2,99% y 5,79%, posibilitando la mejora del agua de riego utilizada en la producción de maíz (Bui, 2017). Los mismos autores aseguran que la EUAR aumenta con el RD, las cantidades pequeñas de irrigación aumentan la ETc linealmente hasta un punto donde la relación se vuelve curvilínea, porque parte del agua aplicada no se usa en ETc bajo riego completo.

En condiciones de déficit de agua, excepto en la etapa de FL, el maíz irrigado con déficit pudo producir más rendimiento de grano por unidad de agua de riego aplicada que el maíz sujeto a riego completo. Esto tuvo importantes implicaciones económicas porque significó que los retornos económicos podrían ser altos para los usuarios que pagaron altos costos por el agua irrigada (Bui, 2017).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló en el campo experimental de riego de la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni” de la Facultad de Agronomía, ubicado en el Departamento de Paysandú a 32° 22' S y 58° 03' W, durante el año agrícola 2016/17.

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

Cuadro 1. Características hidrológicas del suelo

Horizonte	Profundidad (cm)	Dap (gr.cm ⁻³)	CC (mm)	PMP (mm)	CAAD (mm)
A	0-20	1,25	54	28	26
B	20-70	1,34	235	150	85
AB	0-70		289	178	111

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

2.1. MANEJO EXPERIMENTAL

En el mes de agosto se realizó laboreo convencional en ambos ensayos realizada con rastra excéntrica y rastra de dientes. El maíz fue sembrado el 28 de octubre de 2016, el material genético utilizado fue el híbrido AX 7822 Víptera 2 de ciclo intermedio, instalado en parcelas de 5 surcos con 5 m de largo, con una distancia entre hileras de 0,7 m. Se realizó un ajuste manual de plantas en el estadio V2 (Ritchie y Hanway, 1982) con el objetivo de lograr una población de 100.000 plantas.ha⁻¹.

El ensayo de soja se sembró el 7 de noviembre de 2016, las parcelas estuvieron conformadas por 5 surcos de 5 m de largo, con una distancia entre hileras de 0,4 m. El cultivar utilizado fue DM 4915 IPRO, con hábito de crecimiento indeterminado. En el estadio fenológico V2 (Fehr y Caviness, 1977) se realizó un ajuste manual de plantas con el objetivo de lograr una población de 350.000 plantas.ha⁻¹.

El manejo sanitario de malezas e insectos fue con el objetivo de lograr el máximo control de estos factores. Se realizaron 2 aplicaciones de herbicida glifosato pre-siembra, en el caso de los dos cultivos, a razón de 2 L.ha⁻¹. En el caso del maíz simultáneamente se realizó una aplicación de herbicida Atrazina y Metolaclor (Dual Gold®) a razón de 1 L.ha⁻¹ y 2 L.ha⁻¹, respectivamente. En soja se aplicó 1,5 L.ha⁻¹ de insecticida Clorpirifos (Lorsban®) para control de lagartas foliares, 0,5 L.ha⁻¹ de fungicida Pyraclostrobin (Opera®) para controlar *Septoria glycines* y 0,2 L.ha⁻¹ de insecticida Tiametoxam y Lambdacialotrina (Engeo®) para control de chinches, específicamente *Nezara viridula*. No existiendo aplicaciones de insecticidas en maíz.

En ambos cultivos se fertilizó en presiembra con sulfato de calcio (CaSO₄), basado en los valores de azufre de los análisis de suelo. En el caso del maíz en V6 y V10 se fertilizó con 150 kg.ha⁻¹ de N en cada estadio, utilizando como fuente urea (46-0-0).

Se instalaron 5 estrategias de riego, las cuales se basaron en umbrales de riego, definiendo como bienestar hídrico cuando los cultivos obtienen una disponibilidad de agua en el suelo por encima de 40% en los periodos no críticos (PNC) y por encima del 60% en los PC. Y como deficiencias hídricas, agua disponible (AD) por debajo del 40% en los PNC y por debajo del 60% en los PC.

- Las estrategias de riego evaluadas fueron:

- RT: Bienestar hídrico durante todo el ciclo.
- RDC PC: RDC en PC, induciendo deficiencias hídricas en los PNC.
- RDC PC V+PC: RDC en etapa V y PC, induciendo deficiencias hídricas en la FL en soja y LLG en maíz.
- RDC PC+LLG (maíz) y RDC FL+PC (soja): RDC en PC y LLG en maíz, y RDC en PC y FL en soja, induciendo deficiencias hídricas en la etapa V de ambos cultivos.
- RD: 50% del riego del RT.

El diseño experimental fue de bloques completos al azar con tres repeticiones (Fig. 1 y Fig. 2). En todas las estrategias de riego se estableció el bienestar hídrico en el PC, ya que se ha estudiado extensamente que deficiencias durante este periodo del cultivo provocan pérdidas significativas de rendimiento (Giménez 2012, Bidegain 2012, Grasso y Montero 2011, Çakir 2004). El PC en soja fue considerado como las etapas entre R4 a R6 y el PC en maíz se consideró al entorno de la FL definido como 15 días antes y 15 días después del inicio de la FL femenina.

BIII	RD	RT	RDC PC+LLG	RDC V+PC	RDC PC
BII	RDC PC+LLG	RDC V+PC	RDC PC	RD	RT
BI	RDC PC	RD	RT	RDC V+PC	RDC PC+LLG

Figura 1. Croquis del ensayo de maíz.

BIII	RDC PC	RT	RDC V+PC	RDC FL+PC	RD
BII	RD	RDC FL+PC	RDC PC	RDC V+PC	RT
BI	RT	RDC V+PC	RD	RDC PC	RDC FL+PC

Figura 2. Croquis del ensayo de soja.

- Modelo estadístico implementado:

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

donde: μ es la media general, t es el efecto de los tratamientos, β es el efecto de los bloques, ϵ es el error experimental, siendo i : las cinco estrategias de riego evaluadas RT, RDC PC, RDC V+PC, RDC PC+LLG (maíz)/RDC FL+PC (soja) y RD, j = bloques 1, 2 y 3. Se realizó un análisis de la varianza (ANAVA) y se utilizó el test de Tukey en todos los casos con un nivel de significación del 5% para comparación de medias. Los análisis fueron realizados mediante el software estadístico InfoStat (versión estudiantil, 2008).

2.2. INSTALACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE RIEGO

El riego se aplicó con un equipo por método de goteo debido a que ofrece una mayor precisión para la entrega de las cantidades de agua y permite que el experimento ocupe una menor superficie, ambos factores ayudan a minimizar el error experimental en el análisis de los datos (Torrion et al., 2014). Se utilizaron cintas de polietileno de baja densidad con goteros cada 30 cm y un caudal de 1,6 L.h⁻¹.

En las estrategias sin deficiencias hídricas, el riego se inició cuando el porcentaje de AD descendió de 60% durante el PC y en los ENC de 40%, con el objetivo de alcanzar el 90% de AD en ambos casos. En los tratamientos con deficiencias hídricas se permitió que el AD disminuyera hasta 20%.

Para lograr los umbrales hídricos planificados, se realizaron dos tipos de intervenciones: riego suplementario e intercepción de las PP en las estrategias de riego con déficit hídrico a través de la utilización de simuladores de sequía parcelarios y móviles. Los mismos fueron construidos en estructuras de hierro con cubiertas de lona impermeable. Las dimensiones de los simuladores se adecuaron al

tamaño de las parcelas. Estos fueron colocados sobre las parcelas de cultivo en las que se definió interceptar las PP, antes de cada evento y retirados inmediatamente después de los mismos. La colocación de los simuladores se realizó en base a los pronósticos meteorológicos de corto plazo. Las parcelas estuvieron limitadas externamente por una ronda de 20 cm de altura construida en tierra, para impedir la entrada de agua de escurrimiento. En cada parcela se construyó un desagüe para evacuar el agua de lluvia proveniente de los simuladores.

Las decisiones de riego se realizaron en base a los resultados de balances hídricos de suelos de paso diario simplificado y se estimó el contenido de AD del suelo de la siguiente forma

$$\Delta S = PP + R - ETc_{aj}$$

siendo ΔS la variación del AD (mm), PP las precipitaciones (mm), R el riego (mm) y ETc_{aj} la evapotranspiración del cultivo ajustada (mm). Esta última también fue calculada diariamente de la siguiente manera

$$ETc_{aj} = ETo \times Kc \times Ks$$

siendo ETo la evapotranspiración del cultivo de referencia (mm), Kc el coeficiente del cultivo y el Ks el coeficiente de estrés hídrico. La misma se estimó utilizando la ecuación de FAO Penman-Monteith y para los Kc se utilizaron los propuestos por FAO (Allen et al., 1998). Las variables que determinan los valores de ETo fueron medidas mediante una estación meteorológica automática Vantage Pro 2TM, modelo 6510 (Davis Instrumentals, Hayward, CA) ubicada en la EEMAC.

En el Cuadro 2 y 3, se muestran las PP totales ocurridas durante los ciclos de los cultivos, el volumen de riego y el número de eventos y el volumen de PP interceptado por los simuladores, para cada estrategia de riego.

Cuadro 2. Número de riegos, riego aplicado (mm), precipitación (mm), número de eventos interceptados y precipitación interceptada (mm) según estrategia de riego en maíz.

Estrategias de riego	Número de riegos	Riego aplicado (mm)	Precipitaciones (mm)	Número de eventos interceptados	Precipitaciones interceptadas (mm)
RT	13	259	805	0	0
RDC PC	5	92	296	8	497
RDC V+PC	10	175	353	6	440
RDC PC+LLG	8	175	748	2	57
RD	13	133	805	0	0

Cuadro 3. Número de riegos, riego aplicado (mm), precipitación (mm), número de eventos interceptados y precipitación interceptada (mm) según estrategia de riego en soja.

Estrategias de riego	Número de riegos	Riego aplicado (mm)	Precipitaciones (mm)	Número de eventos interceptados	Precipitaciones interceptadas (mm)
RT	10	286	887	0	0
RDC PC	5	150	676	9	211
RDC V+PC	7	203	871	3	16
RDC FL+PC	9	266	692	6	195
RD	10	151	887	0	0

2.3. MEDICIONES REALIZADAS

Se midió la humedad del suelo en cada estrategia de riego evaluada con una sonda de neutrones CPN modelo 503DR HIDROPROBE, con una frecuencia semanal.

El objetivo de la medición fue la de obtener una guía para los eventos de riego en forma complementaria a los balances hídricos y comprobar en las estrategias con déficit hídrico, la magnitud del mismo y la comprobación del correcto funcionamiento de los simuladores de sequía y corroborar que las condiciones hídricas fueran acordes a las planificadas. Previamente a la utilización de la sonda en los ensayos, se construyeron regresiones simples, para los perfiles de suelo del campo experimental. Para ello se midió el contenido de humedad del suelo a través del método gravimétrico y se realizaron las lecturas en las mismas profundidades con la sonda de neutrones, obteniendo diferentes calibraciones según el perfil de suelo, $R^2= 0,70$. Cabe destacar que en ambos cultivos se observó una gran correlación de las medidas de sonda de neutrones con los balances hídricos de paso diario simplificados ($R_2=0,80$), con raíz cuadrada media normalizada error $\leq 10\%$.

Para esta medida se instalaron tubos de acceso de aluminio, un tubo por parcela de 1,40 m de profundidad en la entre fila de los cultivos, las medidas se realizaron cada 0,1 m de profundidad. En maíz las fechas en las que se realizaron las mediciones de agua fueron: 31/10, 17/11, 25/11, 30/11, 7/12, 13/12, 20/12, 29/12, 5/1, 10/1, 16/1, 25/1, 2/02 y 20/2. En soja 25/11, 30/11, 7/12, 13/12, 20/12, 29/12, 2/1, 9/1, 16/1, 24/1, 1/02 y 19/2.

Cabe aclarar que las medidas de humedad de suelo a los 10 cm de profundidad presentaron valores muy bajos, probablemente por efecto de la dispersión de neutrones hacia la atmósfera y contenido de materia orgánica. Por lo que este registro de humedad no fue considerado en el análisis y monitoreo de las estrategias de riego.

La cobertura del suelo, el índice de área foliar (IAF) y la radiación fotosintéticamente activa interceptada, se determinó mediante un ceptómetro AccuPar, modelo LP-80. Se realizaron medidas semanales, obteniendo un dato por parcela que se compone del promedio de tres medidas. Las medidas se realizaron

en torno a las 12 h, en días sin nubosidad, colocando la barra con los sensores de forma diagonal en la entrefila, como se describe en el manual Accupar (versión 10).

A su vez se obtuvo el porcentaje de radiación interceptada mediante la siguiente ecuación:

$$RI = [(I_0 - I_t) / I_0] \times 100$$

donde I_0 es la radiación fotosintéticamente activa (RFA) incidente, I_t es la RFA por debajo del canopeo y RI la radiación interceptada expresada en porcentaje.

A partir de estos datos, se calculó porcentaje de intercepción diario, mediante la interpolación lineal entre las mediciones de ceptómetro; se obtuvo la RFA incidente por día, mediante la radiación solar incidente obtenida de la estación meteorológica automática (Vantage Pro 2TM modelo 6510, Davis Instrumentals, Hayward, CA) ubicada en la EEMAC, el cual fue multiplicado por el factor 0,48 para transformarlos a RFA (MJ m^{-2}), y se expresaron en $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Birch et al., 1999). Este valor se multiplicó por el porcentaje de intercepción diario correspondiente, para obtener la RFA interceptada diaria la cual fue acumulada de emergencia a V10, de V10 a R2, de R2 a MF y de emergencia a MF en maíz, y de emergencia a R1, de R1 a R4, de R4 a R6 y de emergencia a R6 en soja.

Se utilizó el modelo de simulación SIMDualKc, que permite separar la evapotranspiración (ET) en la evaporación del suelo (E_s) y la transpiración real del cultivo (T_c). El modelo fue calibrado y validado en trabajos previos en Paysandú, Uruguay. Las validaciones de calibración del modelos se realizaron comparando el contenido de agua del suelo observado y previsto, obteniendo una buena precisión para las estimaciones de agua, con raíz cuadrada media normalizada error $\leq 7,6\%$ (Giménez, 2017). Para las características de los cultivos, el tipo de suelo, eventos climáticos y riegos aplicados, se utilizó el modelo, pudiendo obtener las salidas de

agua del suelo esorrentía, evaporación del suelo, percolación profunda y transpiración del cultivo.

Otra medida realizada, fue la altura de planta (cm), la cual se consideró desde el suelo hasta la inserción de la última hoja, se tomaron 10 mediciones de plantas en la hilera central en cada parcela. El objetivo de la medición fue la de obtener un seguimiento del crecimiento del cultivo en cada tratamiento evaluado. Se realizaron mediciones fenológicas semanalmente utilizando la escala de Fehr y Caviness (1977) para soja y la escala de Ritchie y Hanway (1982) para el maíz, con el fin de tomar decisiones de manejo.

La tasa de crecimiento de los cultivos (TCC) durante el PC se determinó realizando el corte de un metro lineal de plantas al inicio y al final del PC para medir la producción de materia seca (MS). Los muestreos fueron realizados el 21/12 y 24/1 para maíz, y el 25/1 y 1/3 para soja. En maíz también se midió la MS a la cosecha del cultivo el 7/3. Las muestras frescas se pesaron en el laboratorio y una sub-muestra proveniente de cada parcela se secó en estufa a 60°C hasta obtener peso constante, obteniendo el porcentaje de MS acumulada.

La cosecha de maíz se realizó en nueve metros lineales del centro de cada parcela y se registraron los siguientes datos: número de plantas, número de espigas por planta, número de espigas totales y peso fresco total de la muestra, en cada estrategia de riego evaluada. Posteriormente, se eligió al azar una planta de cada parcela (sub-muestra) la cual se secó en estufa a 60°C hasta obtener el peso constante. Este mismo procedimiento, se realizó con las chalas y los marlos, con el fin de obtener la acumulación de la MS total. A su vez, se determinó el número de granos por hilera, las hileras por espiga, los granos por espiga, se midió la longitud de la espiga, el peso de mil granos, el porcentaje de humedad y el peso total.

En soja, se cosecharon nueve metros lineales, el 29/3, con el fin de estimar los componentes y subcomponentes de rendimiento para todas las estrategias

evaluadas. Para obtener los componentes principales de rendimiento en los 9 metros cosechados se midió porcentaje de humedad, peso de mil granos y peso total. Para los sub-componentes de rendimiento se cosechó un metro lineal de plantas de la hilera central en cada parcela. En el tallo principal se midió el número de nudos fértiles, número de vainas, número de granos por planta y número de ramas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

En la Figura 3, se observan las PP mensuales acumuladas registradas en la temporada 2016-17 y en la serie histórica 1961-2009. Se destacan las PP del mes de febrero con 462 mm, siendo este volumen 253% superior al valor promedio de la serie histórica, registrada en Paysandú. Cabe destacar que el mes de febrero coincidió con el PC de soja y una parte del LLG en maíz. A su vez, las PP de octubre y noviembre estuvieron por debajo de la media histórica, siendo un 26 y 20% inferior respectivamente.

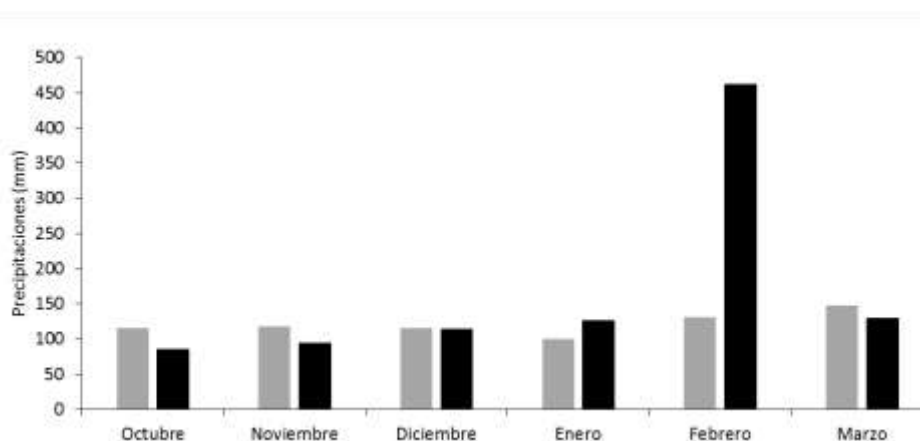


Figura 3. Precipitaciones mensuales (mm) ocurridas durante el ciclo de los cultivos, para la temporada 2016-2017 (columnas negras) y el promedio histórico 1961-2009 (columnas grises).

En la Figura 4, se presenta la radiación solar incidente como promedio diario mensual de la temporada 2016-17 y de la serie histórica 2002-2015. Se pueden observar valores más elevados durante los meses de noviembre y diciembre, siendo un 10 y 5% mayores al rango histórico, respectivamente. Y valores por debajo de la serie histórica en los meses de enero y febrero, siendo un 7 y 3%, respectivamente.

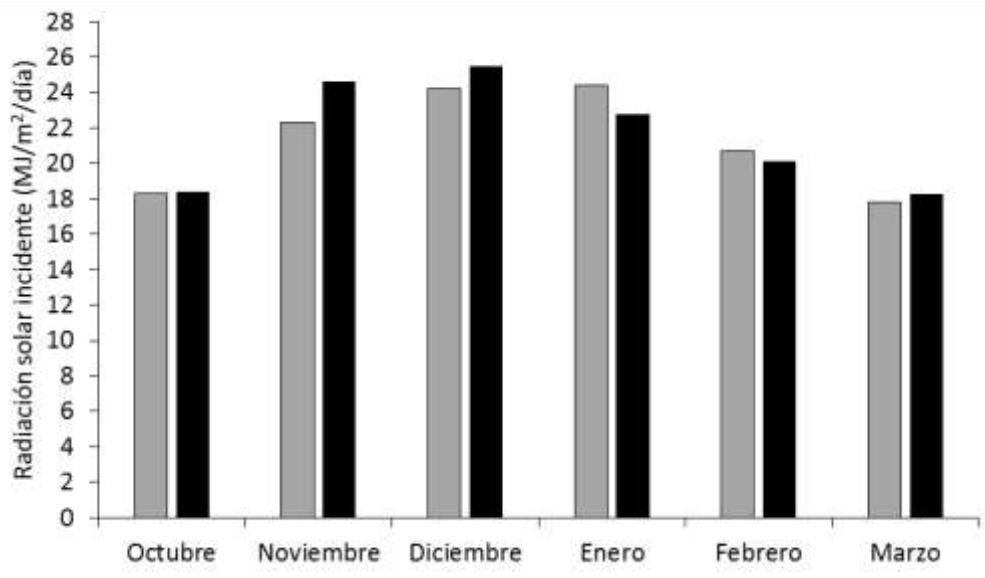


Figura 4. Radiación solar incidente promedio ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$) ocurridas durante el ciclo de los cultivos, para la temporada 2016-17 (columnas negras) y para la serie histórico 2002-2015 (columnas gises).

Se destacó enero con las PP mayores las que correlacionaron con la menor radiación solar diaria promedio y también las PP menores de noviembre explicaron la mayor radiación solar de este mes. Sin embargo, las PP de febrero no se tradujeron en una reducción de la radiación solar diaria promedio, ya que las PP acontecieron de forma concentrada, ocurriendo menores días de nubosidad durante este mes.

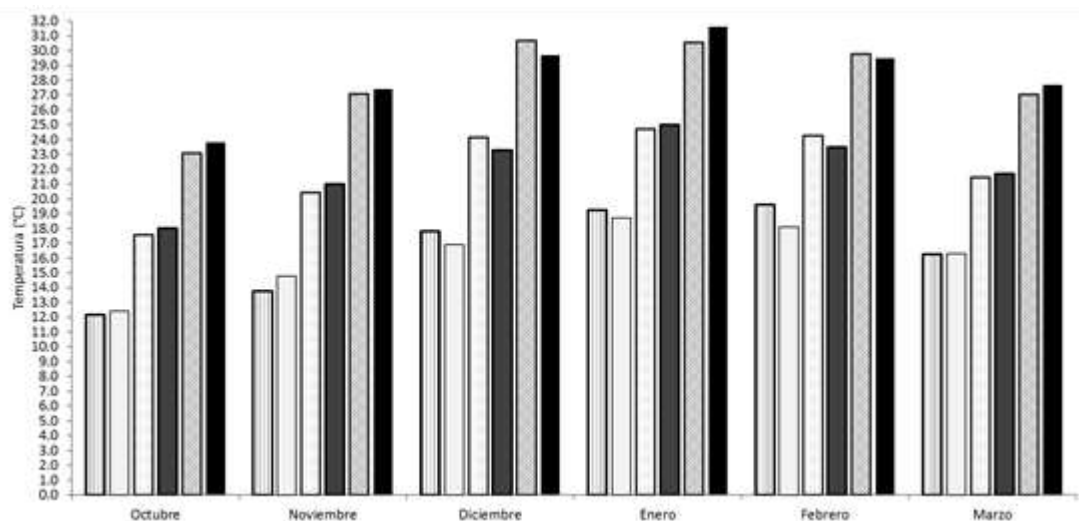


Figura 5. Temperaturas (°C) medias (columnas grises oscura y columna con puntos), mínimas (columnas grises claras y columnas con líneas horizontales) y máximas ocurridas (columnas negras y columnas con líneas diagonales) durante el ciclo de los cultivos. En columnas de colores grises y negras serie histórica 2002-2015 y en columnas con tramas temporada 2016-17.

En la Figura 5, se presentan las temperaturas medias, mínimas y máximas de la temporada 2016-17 y la serie histórica 2002-2015. Se observan como las temperaturas obtenidas fueron similares a las de la serie histórica.

3.2. FENOLOGÍA DE LOS CULTIVOS

En los Cuadros 4 y 5, se presenta la evolución de los diferentes estadios fenológicos de maíz y soja, respectivamente. El seguimiento de los estadios fenológicos semanalmente mostró que las deficiencias hídricas provocadas en las estrategias RDC PC y RDC V+PC acortaron la longitud de las últimas etapas de desarrollo de maíz. Se evidenció un adelanto en la maduración del cultivo provocado por deficiencias hídricas durante el LLG, siendo cosechadas 6 días antes las estrategias de riego RDC PC y RDC V+PC, como se observa en el Cuadro 4. En soja, no existieron grandes diferencias en la duración de los diferentes estadios fenológicos entre las estrategias de riego evaluadas (Cuadro 5).

Cuadro 4. Estadios fenológicos de maíz en fecha de ocurrencia y días acumulados pos-siembra, para todas las estrategias de riego evaluadas, riego total (RT), riego deficitario controlado en periodo crítico (RDC PC), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (RDC V+PC), riego deficitario controlado en periodo crítico y llenado de granos (RDC PC+LLG) y riego deficitario 50% del riego total (RD).

Estadio fenológico (RT, RD, RDC PC+LLG)	Días acumulados pos-siembra	Estadio fenológico (RDC PC, RDC V+PC)	Días acumulados pos-siembra
Emergencia	14	Emergencia	14
V3.5	33	V3.5	33
V5	40	V5	40
V7	47	V7	47
V9	53	V9	53
V11	62	V11	62
R1.5	70	R1.5	70
R2	76	R2	76
R2.5	84	R2.5	84
R3	90	R3	90
R4	98	R4	98
R5	116	R5	111
R6	125	R6	116
cosecha	131	cosecha	125

Cuadro 5. Fenología de soja según fecha de medición y días acumulados pos-siembra, para todas las estrategias de riego.

Estadio fenológico	Días acumulados
siembra	0
Emergencia	9
V2	24
V3.5	29
V5	36
V7	42
V8	51
R1	59
R2	65
R3	73
R4	79
R5	83
R5.5	88
R5.8	100
R6	105
R6.2	120
R6.5	127
R7	133
R8	142

3.3. DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL SUELO

En el Cuadro 6, se presenta la disponibilidad hídrica de cada estrategia de riego en maíz, como era esperable el RT presentó la mayor disponibilidad hídrica,

dado que el mismo fue regado durante todo el ciclo del cultivo. El RD fue la estrategia que tuvo mayor contenido de agua luego del RT, producto de un mayor aporte de agua por PP efectivas debido a la menor aplicación de riego, siendo más efectivo el aprovechamiento de las PP. El volumen de AD mayor en la estrategia RDC PC+LLG en comparación al RDC V+PC fue producto del mayor aporte de las PP efectivas durante la etapa de LLG. La etapa de LLG se ubicó principalmente durante el mes de febrero en el que ocurrieron PP superiores a 400 mm. Por otra parte, la estrategia RDC PC fue la que mostró la menor disponibilidad hídrica debido a que fue la que recibió menor aplicación de riego.

Cuadro 6. Contenido de Agua disponible efectiva total (mm) compuesta por precipitaciones (PP) efectivas y riego efectivo, según estrategia de riego para maíz. Riego total (RT), riego deficitario controlado en periodo crítico (RDC PC), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (RDC V+PC), riego deficitario controlado en periodo crítico y llenado de granos (RDC PC+LLG) y riego deficitario 50% del riego total (RD).

Estrategias de riego	PP efectivas *1 (mm)	Riego efectivo *2 (mm)	Agua disponible efectiva (mm)
RT	289	233	522
RDC PC	173	82	255
RDC V+PC	190	158	348
RDC PC+LLG	262	158	420
RD	360	120	480

*1Precipitaciones efectivas (mm), no se consideran PP por encima de CC; y *2riego efectivo aplicado (mm), considerado como el 90% del riego total aplicado.

En el Cuadro 7, se presentan las disponibilidades hídricas de las diferentes estrategias de riego evaluadas en soja. La disponibilidad hídrica mayor, al igual que en el maíz, se obtuvo en la estrategia con RT durante todo el ciclo, por su aporte de riego efectivo mayor. Mientras que la estrategia de RD obtuvo una cantidad de AD semejante al RT como consecuencia de los mayores volúmenes de PP efectivas. Esto ocurrió como producto de la eficiencia mayor en el aprovechamiento de las PP, las menores aplicaciones de riego en la estrategia de RD aumentó la capacidad de captar PP efectivas. En cuanto a la estrategia de RDC V+PC obtuvo un mayor volumen de AD efectiva en comparación a la estrategia de RDC FL+PC como consecuencia de las PP mayores ocurridas durante las etapas de riego, únicamente en la etapa V presentó 153 mm de PP. Por último, la estrategia de RDC PC fue la que mostró el menor volumen de AD, producto de las deficiencias hídricas provocadas en la etapa V y en la FL.

Cuadro 7. Contenido de Agua disponible efectiva total (mm), compuesta por precipitaciones (PP) efectivas y riego efectivo, según estrategia de riego para soja. Riego total (RT), riego deficitario controlado en periodo crítico (RDC PC), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (RDC V+PC), riego deficitario controlado en floración y periodo crítico (RDC FL+PC) y riego deficitario 50% del riego total (RD).

Estrategias de riego	PP efectivas *1 (mm)	Riego efectivo *2 (mm)	Agua disponible efectiva (mm)
RT	287	257	544
RDC PC	198	135	333
RDC V+PC	315	183	498
RDC FL+PC	183	239	422
RD	373	136	509

*1PP efectivas (mm), no se consideran PP por encima de CC; y *2riego efectivo aplicado (mm), considerado como el 90% del riego total aplicado.

Es importante destacar, la disponibilidad hídrica ajustada a los requerimientos que presentó el RT durante el ciclo de crecimiento de ambos cultivos y el aporte del 50% aproximadamente de PP efectivas en el total del AD. La estrategia de RD fue la que más se aproximó al RT en AD efectiva total, en ambos cultivos. Por último, se destacó la estrategia de RDC PC que fue la que presentó el volumen de AD efectiva menor, en ambos cultivos, producto de las deficiencias hídricas en los PNC.

3.3.1. Evolución del agua disponible en el suelo

En las Figuras 6 y 7, se presentan la evolución del agua disponible en las estrategias de riego evaluados en maíz y soja, respectivamente. Se observan los umbrales hídricos de riego utilizados en el ensayo, ellos fueron como se indicó 40% AD en los PNC y 60% AD en los PC de los cultivos (Dardanelli et al. 2003, Andrade y Sadras 2000, Shaw 1974), así como también los eventos de riego y las PP efectivas.

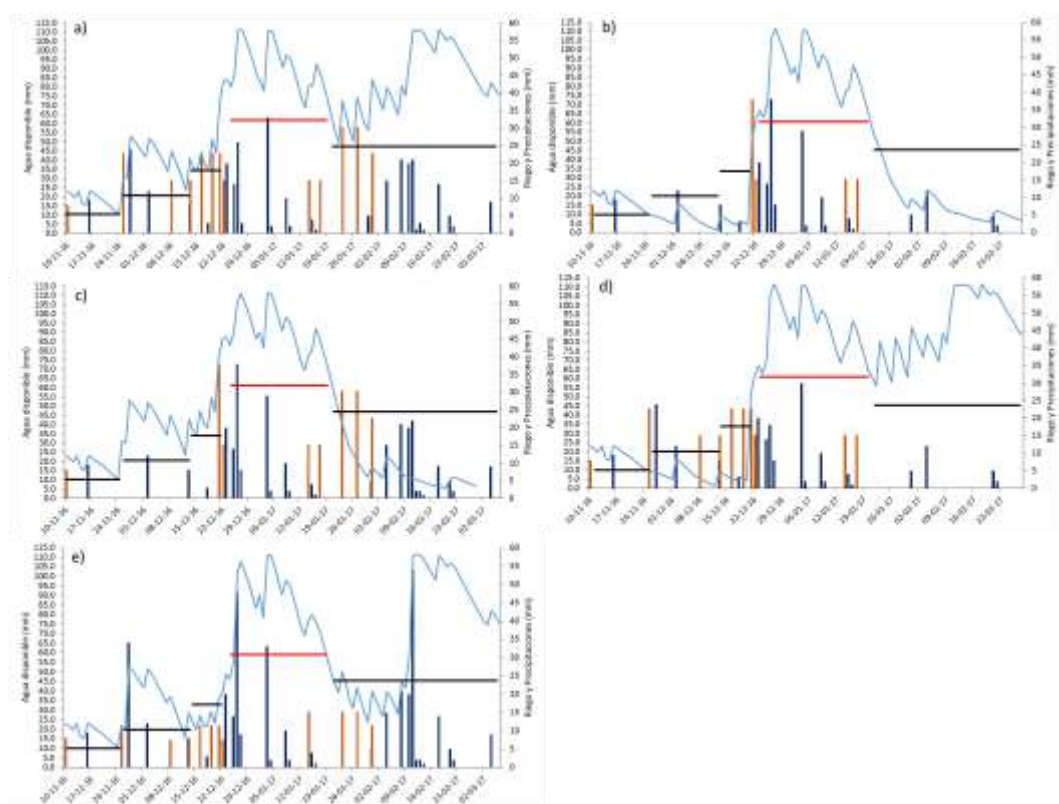


Figura 6. Evolución de agua disponible en el suelo en mm (línea celeste), PP efectivas (mm), columna azul y riego efectivo (mm), columna marrón, para las estrategias de riego evaluadas en maíz. Riego total (a), riego deficitario controlado en periodo crítico (b), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (c), riego deficitario controlado en periodo crítico y llenado de granos (d) y riego deficitario 50% del riego total (e). Umbral hídrico de riego en periodos no críticos (líneas negras), umbral hídrico de riego en el periodo crítico (línea roja).

En la Figura 6, se observa que los valores de AD concuerdan con los objetivos en todas las estrategias de riego planteadas en el ensayo de maíz, obteniendo deficiencias y bienestar hídrico, según se requería en cada estrategia. Cabe aclarar que al inicio del ciclo de los cultivos todas las estrategias de riego evaluadas presentaron el 100% de AD a la profundidad radicular estimada para el logro de una correcta implantación.

Se destaca la disponibilidad hídrica de la estrategia de RD, la cual fue la más dependiente de las PP, ya que en esta estrategia no se indujeron deficiencias hídricas. En la etapa V, se mantuvo 11 días con deficiencias hídricas, es decir por debajo de 40% AD, con una menor magnitud en comparación al resto de las estrategias, en las cuales se les indujeron deficiencias durante esta etapa. El resultado, es consecuencia de la aplicación del 50% de lámina del RT y ausencia de PP, no logrando alcanzar el umbral hídrico de riego establecido. De la misma manera, sucede durante la etapa de LLG, presentando deficiencias hídricas durante 16 días, mientras que en el resto del ciclo el AD estuvo por encima de los umbrales hídricos de riego (Fig. 6e).

Como se observa en la Figura 7, en soja, todas las estrategias evaluadas se llevaron a cabo en forma correcta, concretando el objetivo de cada una de ellas con respecto a los umbrales hídricos establecidos. Al igual que en maíz, al inicio del ciclo de los cultivos todas las estrategias de riego presentaron el 100% de AD a la profundidad radicular estimada, para su correcta implantación. Asimismo, cabe destacar que al final del ciclo de R7 a R8 todas las estrategias de riego obtuvieron el mismo manejo, estando por encima de los umbrales hídricos de riego.

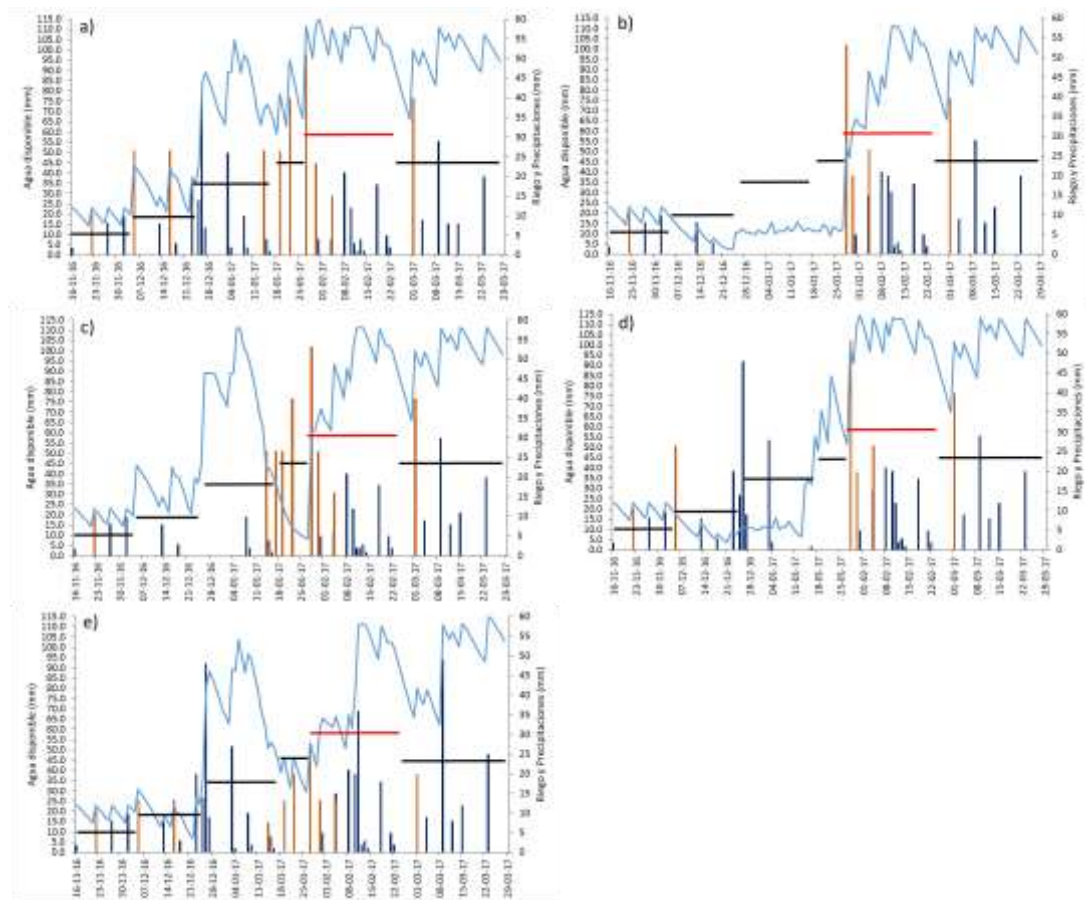


Figura 7. Evolución de agua disponible en el suelo en mm (línea celeste), PP efectivas (mm), columna azul, y riego efectivo (mm), columna marrón, en las diferentes estrategias de riego evaluadas en soja, riego total (a), riego deficitario controlado en periodo crítico (b), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (c), riego deficitario controlado en floración y periodo crítico (d), riego deficitario al 50% del riego total (e). Umbral hídrico en periodos no críticos (líneas negras), umbral hídrico en el periodo crítico del cultivo (línea roja).

En cuanto a la estrategia de RD presentó deficiencias hídricas menos severas que en el resto de las estrategias evaluadas de RDC, como consecuencia del riego y de las PP ocurridas, se constataron deficiencias hídricas solo durante 12 días en la etapa V y en 8 días de la etapa de FL (Fig. 7e).

3.4. HUMEDAD DEL SUELO

En la Figura 8, se presentan las medidas de humedad del suelo en maíz realizadas con sondas de neutrones. A modo general, se puede observar que los valores más altos y dispersos se concentraron a una profundidad de suelo de 20 a 50 cm. Asimismo, en los horizontes más profundos a partir de 70 cm, se encontraron los valores más bajos y menos variables. Esto sugiere que la mayor parte de la masa radicular estaría en los primeros 70 cm de suelo. Wani et al. (2012), mencionan que las raíces tienen un crecimiento localizado en los primeros 30-60 cm del suelo, pero cuando existen períodos prolongados de días secos se induce el crecimiento radicular hacia capas inferiores del perfil del suelo.

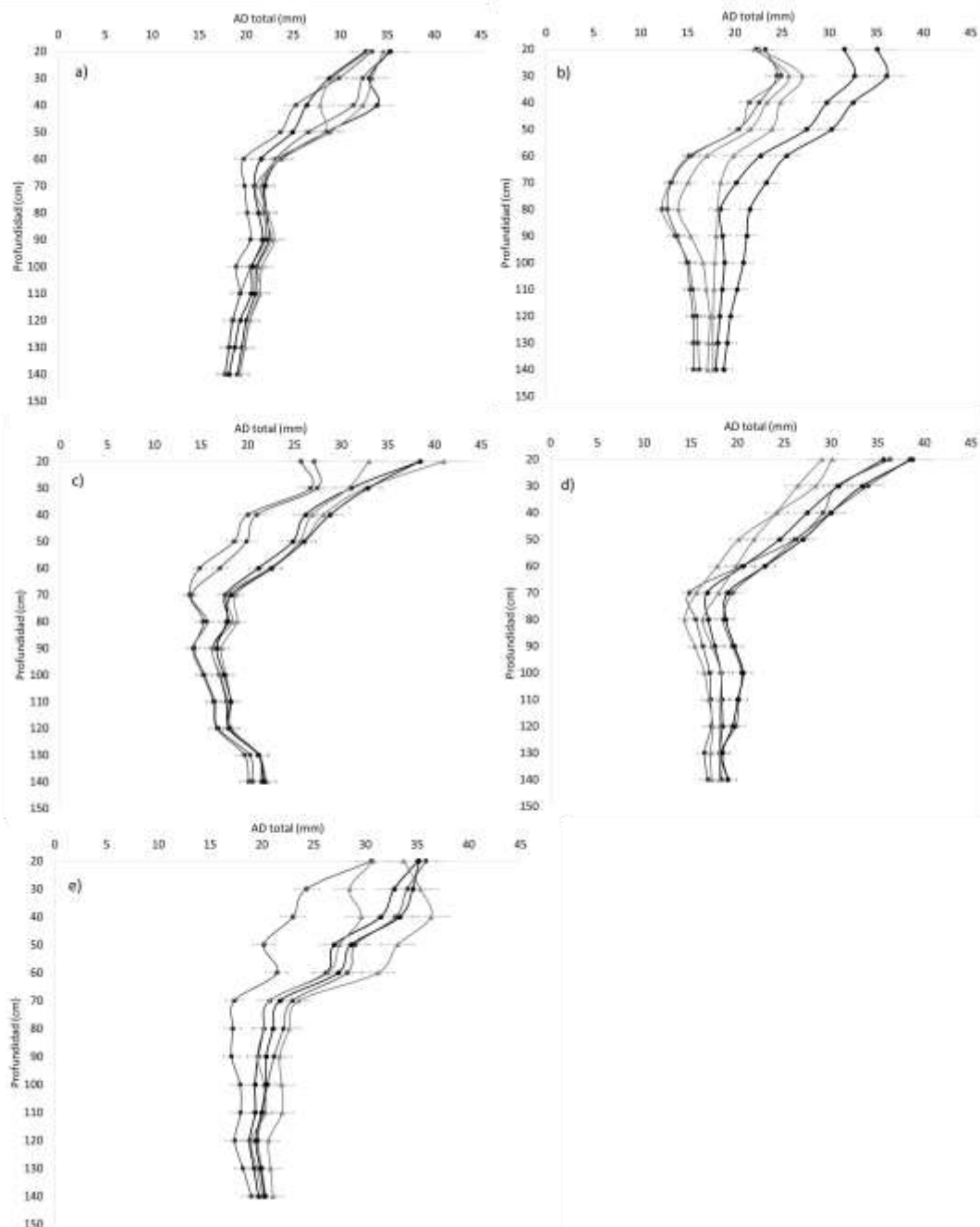


Figura 8. Contenido de agua total (mm) por profundidad (cm) en diferentes etapas de crecimiento del maíz, vegetativa (triángulos), periodo crítico (círculos) y llenado de granos (cuadrados), para las diferentes estrategias de riego evaluadas. Riego total (a), riego deficitario controlado en periodo crítico (b), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (c), riego deficitario controlado en periodo crítico y llenado de granos (d), riego deficitario al 50% del riego total (e).

En la Figura 8b, se observa que en la estrategia de RDC PC existió una diferencia en la extracción hídrica del suelo en comparación con el RT (Fig. 8a), observando una extracción a una profundidad mayor, al existir cambios de humedad hasta los 80 cm, y luego no se detectaron cambios de humedad en los horizontes más profundos del suelo. Esto puede ser producto de una exploración radicular a profundidad mayor, a causa de las deficiencias hídricas ocurridas en la etapa V y LLG, como indican García y Ferrarotto (2009). Asimismo, Farré y Faci (2009) trabajando con riego moderado y seco respectivamente, hallaron que la absorción se realizó hasta los 90 cm, disminuyendo el consumo de agua a 120 cm.

En la estrategia RDC PC, se observaron niveles de humedad menores en todo el perfil del suelo con respecto al RT, durante la etapa V y la etapa de LLG, como consecuencia de las deficiencias hídricas durante estas etapas fenológicas, destacándose los mayores valores de humedad durante el PC (Fig. 8b).

En la estrategia de RDC V+PC, los niveles alcanzados de humedad del suelo menores coinciden con la etapa de LLG (Fig. 8c), producto de las deficiencias hídricas durante esta etapa, presentando los mayores valores de humedad durante la etapa V y PC. Se destacó además la disminución de la humedad en el suelo hasta los 70 cm en todas las mediciones, no detectándose variaciones a mayor profundidad.

Cabe destacar que la estrategia de RDC PC+LLG fue la que presentó mayor volumen de agua en superficie durante PC y LLG (Fig. 8d), presentando los valores más bajos de medición en la etapa V en la que se indujeron deficiencias hídricas, remarcando estas diferencias en los primeros 70 cm de suelo.

Por último, la estrategia de RD mostró similares contenidos de humedad en el suelo en comparación con la estrategia de RT, producto de las PP ocurridas durante el ciclo, exceptuando el contenido de agua menor durante las etapas V y LLG (Fig. 8e) como consecuencia de las deficiencias hídricas ocurridas durante periodos

cortos por la ausencia de PP y las menores láminas de riego aplicadas que en RT (Fig. 6e).

En la Figura 9, se presenta la humedad del suelo en soja, este cultivo mostró en profundidad diferencias con maíz, en las estrategias de riego evaluadas.

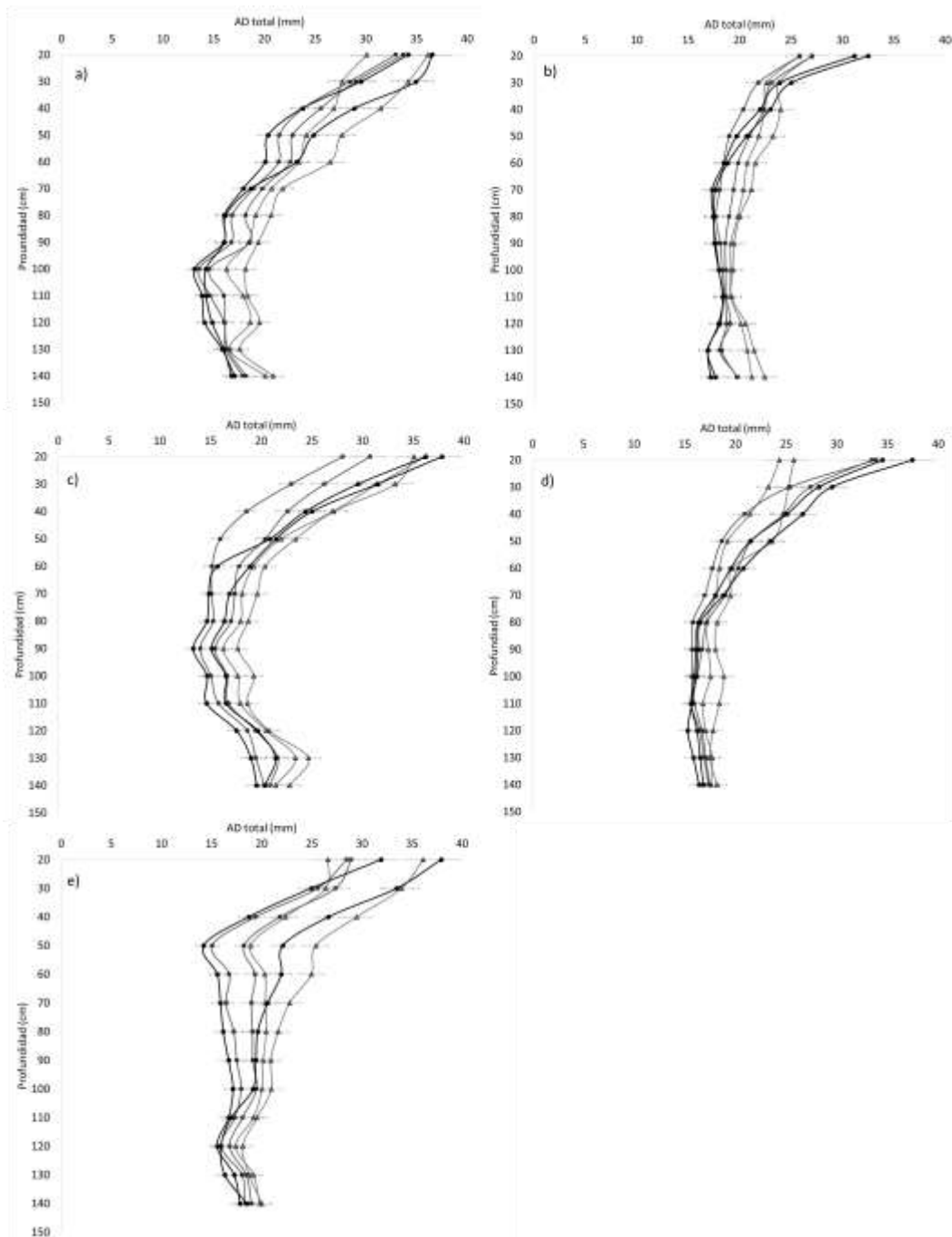


Figura 9. Evolución del contenido de agua total (mm) por profundidad (cm) en las diferentes etapas de crecimiento en soja, vegetativa (triángulos), floración (cuadrados) y periodo crítico (círculos), para las diferentes estrategias de riego evaluadas. Riego total (a), riego deficitario controlado en periodo crítico (b), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (c), riego deficitario controlado en floración y periodo crítico (d), riego deficitario 50% del riego total (e).

Las mayores variaciones de humedad en las estrategias de riego evaluadas se constataron en los primeros 50 cm de profundidad durante el PC, al disponer de riego en todas las estrategias y producto del alto consumo hídrico durante esta etapa. Como se observa en la Figura 9a, el RT presentó valores de humedad elevados durante todo el ciclo al disponer de bienestar hídrico. A su vez, fue la estrategia que presentó diferencias de humedad a mayor profundidad hasta los primeros 80 cm, particularmente durante el PC, se supone que existió una mayor exploración radicular en profundidad de esta estrategia.

En la Figura 9b, se observa que la estrategia de RDC PC fue la que mostró los valores de humedad menores, los que variaron entre 32 y 26 mm en los primeros 20 cm de profundidad, siendo un 14% y 21% menor respectivamente que los valores de humedad en RT. Esto se debió a las deficiencias hídricas en la etapa V y en la FL. Los valores de humedad mayores se obtuvieron durante el PC, ya que el riego levantó las restricciones hídricas, aun así, no se alcanzaron los valores obtenidos en el RT. Estas variaciones de humedad fueron observadas en los primeros 30 cm de profundidad.

En la Figura 9c, se presenta la humedad del suelo en la estrategia de RDC V+PC, se observa que los niveles de humedad en el suelo fueron menores durante la FL debido a las deficiencias hídricas provocadas en esta etapa. El valor mínimo de humedad en los primeros 20 cm de profundidad fue de 28 mm siendo un 15% menor al alcanzado por RT. Mientras que los máximos alcanzados fueron durante las etapas V y PC no diferenciándose del RT. Se destacó también que las mayores variaciones de humedad se observan en los primeros 60 cm de profundidad.

En la Figura 9d, se presentan los valores de humedad en el suelo de la estrategia de RDC FL+PC, la que mostró valores elevados durante FL y PC no diferenciándose del RT en los primeros 30 cm de profundidad, y a su vez los más bajos durante la etapa V donde se indujeron las deficiencias hídricas, siendo un 20%

menor al obtenido por el RT. Se destaca, al igual que la estrategia de riego antes descrita que las mayores variaciones de humedad se observaron en los primeros 60 cm de profundidad. Por lo que se interpreta que las deficiencias hídricas inducidas tanto en la etapa V como en la FL, no se tradujeron en una mayor exploración radicular, como lo expuesto por García y Ferrarotto (2009).

Por último, en la Figura 9e, se presenta la estrategia de RD que se comportó según las láminas de riego, las PP y la demanda del cultivo. Los valores más bajos en el perfil del suelo se obtuvieron en FL e inicios del PC, producto de la ausencia de PP durante este periodo (Fig. 7e), siendo un 15% menor al obtenido por el RT. Asimismo, presentó una menor humedad de suelo durante la etapa V, siendo 13% menor en los primeros 20 cm de profundidad que la estrategia RT, debido a la ausencia de PP y a las menores láminas de riego (Fig. 7e). Durante el resto del ciclo del cultivo, los volúmenes de humedad del suelo se asemejaron a la estrategia de RT. En esta estrategia, se constataron las mayores variaciones de humedad en los primeros 50 cm de profundidad.

3.5. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA EN EL SUELO ESTIMADO A TRAVÉS DEL MODELO SIMDUALKC

Las salidas de agua en el suelo fueron caracterizadas a través del modelo de SIMDualKc de programación de riego, validado y calibrado para la zona del ensayo (Giménez et al., 2017). Asimismo, el modelo fue calibrado en diferentes lugares a nivel mundial (Hui et al. 2017, Pereira et al. 2015, Paço et al. 2014).

3.5.1. Transpiración

3.5.1.1. Maíz

En la Figura 10, se presenta la evolución de la transpiración diaria en las diferentes estrategias de riego evaluadas en maíz. Se puede observar en las

diferentes estrategias de riego subóptimo evaluadas que en determinados etapas del ciclo no se alcanzó el potencial de transpiración.

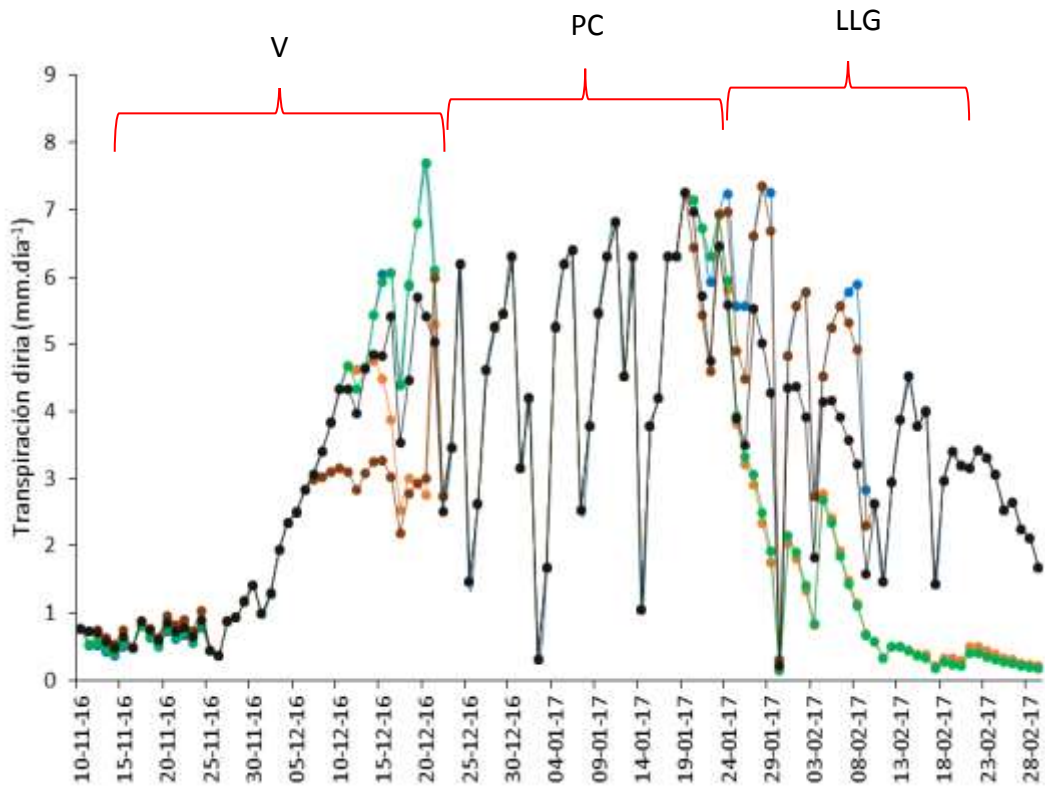


Figura 10. Evolución de la transpiración diaria (mm.día^{-1}) estimada por el modelo de programación de riego SIMDualKc, en las estrategias de riego aplicadas en maíz. Riego total (línea azul), riego deficitario controlado en periodo crítico (línea anaranjada), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (línea verde), riego deficitario controlado en periodo crítico y llenado de granos (línea marrón) y riego deficitario 50% del riego total (línea negra). Las llaves rojas referencia a etapas del cultivo, etapa vegetativa (V), periodo crítico (PC) y llenado de granos (LLG).

En la Figura 11, se presentan las diferentes correlaciones entre la radiación solar incidente diaria y la transpiración diaria obtenidas en cada etapa del maíz para todas las estrategias de riego evaluadas, observando una elevada correlación en el PC.

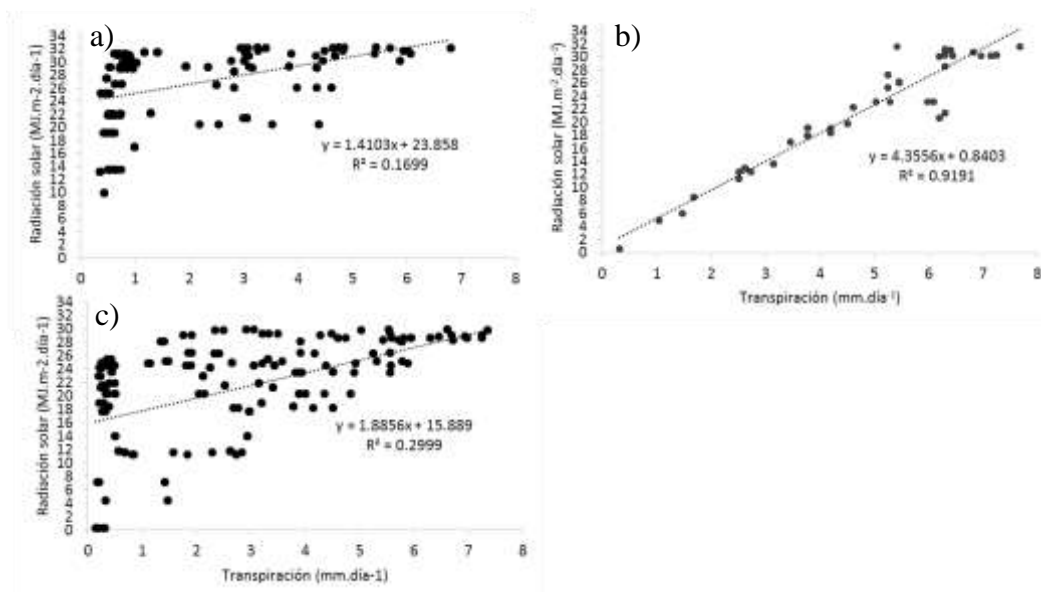


Figura 11. Radiación solar incidente ($\text{Mj.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$) y su relación con la transpiración diaria (mm.día^{-1}) en maíz, durante su etapa vegetativa (a), periodo crítico (b) y llenado de granos (c) en todas las estrategias de riego evaluadas. Riego total, riego deficitario controlado en periodo crítico, riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico, riego deficitario controlado en periodo crítico y llenado de granos, y riego deficitario 50% del riego total.

Las estrategias de RT y RDC V+PC obtuvieron los niveles de transpiración mayores del ensayo. El máximo valor obtenido fue de $7,7 \text{ mm.día}^{-1}$ alcanzado el 20 de diciembre, coincidiendo con la máxima radiación diaria en el ciclo del cultivo y con el inicio del PC. Los mínimos valores de transpiración se encontraron al inicio del ciclo del cultivo V2 por su escaso desarrollo del canopeo y a fines de febrero, periodo en que el cultivo comenzó la senescencia y la etapa de MF.

Las estrategias de RDC en PC y RDC PC+LLG durante la etapa V presentaron los menores valores de transpiración con respecto a las demás estrategias, producto de deficiencias hídricas inducidas durante esta etapa. La estrategia de RD también mostró valores de transpiración bajos a fines de la etapa V, producto de aplicar el 50% de las láminas de RT y a la ausencia de PP (Fig. 6e), por lo cual disponía de una

menor oferta de agua en el suelo disminuyendo su flujo de transpiración, en menor medida que las estrategias ya mencionadas. Estas variaciones de las transpiraciones diarias de las diferentes estrategias de riego, como consecuencia de disponer diferentes disponibilidades hídricas en la etapa V, provocaron la correlación baja con la radiación solar incidente, como se observa en la Figura 11a.

En el PC del cultivo se constató la variación de valores mayor de la transpiración diaria estimada, las cuales coincidieron con los mayores y menores niveles de radiación incidente y temperatura durante este periodo, obteniendo una alta correlación entre las variables (Fig. 11b). Cabe aclarar que los valores no difieren en mayor medida entre las estrategias de riego ya que todas presentaron elevada disponibilidad hídrica durante esta etapa del cultivo.

Por último durante la etapa de LLG las estrategias de RDC PC y RDC V+PC, presentaron los valores menores de transpiración debido a las deficiencias hídricas inducidas durante esta etapa, como se observa en la Figura 10. La estrategia de RD también presentó menores valores de transpiración en LLG debido a la lámina de riego reducida en relación a la estrategia de RT y a la ausencia de PP (Fig. 6). Estas variaciones de transpiraciones diarias de las diferentes estrategias de riego, como consecuencia de disponer de diferentes disponibilidades hídricas en la etapa de LLG, provocaron una correlación baja con respecto a la radiación solar incidente (Fig. 11c).

3.5.1.2. Soja

En la Figura 12, se presenta la estimación de la evolución de la transpiración diaria de las diferentes estrategias de riego evaluadas en soja. Se puede observar que el máximo nivel alcanzado de transpiración diaria fue el 20 de diciembre al igual que en maíz. Sin embargo este fue de mayor valor absoluto, alcanzando $8,4 \text{ mm.día}^{-1}$ obtenidos por la estrategia RT, coincidiendo con el día de mayor radiación solar durante los ciclos del cultivo de $32 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$. Del mismo modo, los menores

valores de transpiración fueron obtenidos el día 2 y 30 de enero, con 0,15 y 0,30 mm.día⁻¹ respectivamente, coincidiendo con los menores valores de radiación solar en el ciclo del cultivo, de 0,5 y 0,3 MJ.m⁻².día⁻¹ respectivamente.

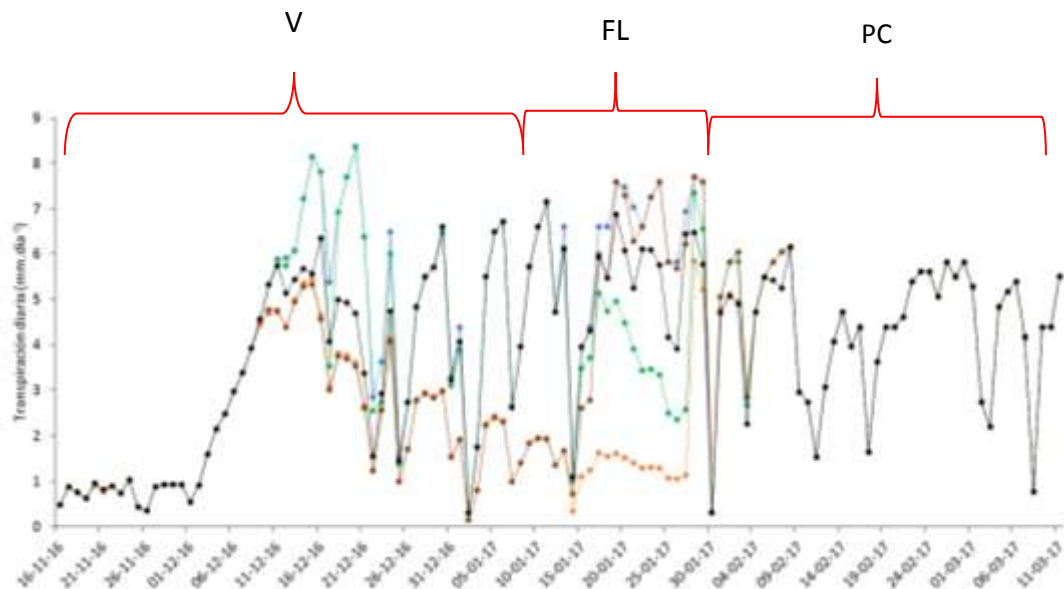


Figura 12. Evolución de la transpiración diaria (mm.día⁻¹) estimada por el modelo de programación de riego SIMDualKc, en las diferentes estrategias de riego aplicadas en soja. Riego total (línea azul), riego deficitario controlado en periodo crítico (línea anaranjada), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (línea verde), riego deficitario controlado en floración y periodo crítico (línea marrón) y riego deficitario 50% del riego total (línea negra). Llaves rojas referencia a diferentes etapas del ciclo del cultivo, etapa vegetativa (V), floración (FL) y periodo crítico (PC).

En la Figura 13, se presentan las diferentes correlaciones entre la radiación solar incidente diaria y la transpiración diaria obtenidas en cada etapa de soja para todas las estrategias de riego evaluadas, observando nuevamente una alta correlación entre las variables durante el PC.

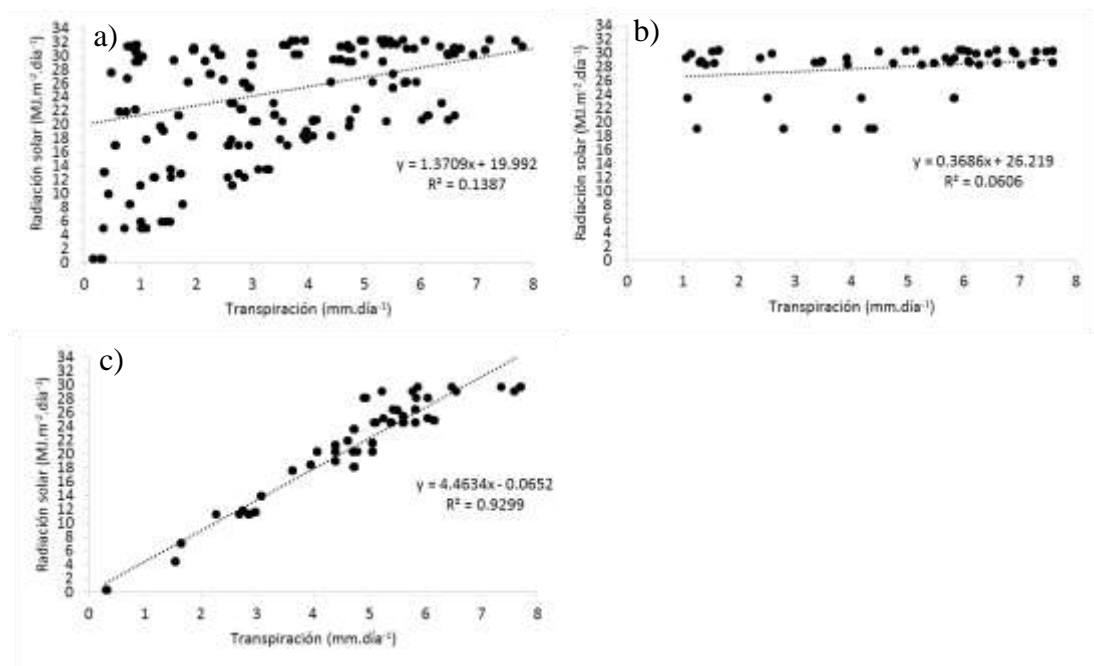


Figura 13. Radiación solar incidente ($\text{Mj.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$) y su relación con la transpiración diaria (mm.día^{-1}) en soja durante la etapa vegetativa (a), floración (b) y el periodo crítico (c) en las estrategias de riego evaluadas. Riego total, riego deficitario controlado en periodo crítico, riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico, riego deficitario controlado en floración y periodo crítico y riego deficitario 50% del riego total.

Como se observa en la Figura 12, durante la etapa V los valores máximos de transpiración alcanzados fueron de la estrategia RT y RDC V+PC diferenciándose de las demás estrategias de riego. La estrategia de RDC PC y la de RDC FL+PC obtuvieron los menores valores de transpiración producto de la deficiencias hídricas inducidas durante la etapa V. Ambas estrategias de riego fueron las que mayor diferencia obtuvieron con respecto a la RT siendo un 30 y 20% inferior respectivamente, en la totalidad del ciclo. En cuanto a la estrategia de RD también obtuvo menores valores de transpiración durante la etapa V debido a las menores aplicaciones de riego y las PP escasas durante esta etapa (Fig. 7), logrando un 11% de la transpiración de RT. Estas variaciones den la transpiración diaria estimada

producto principalmente de las diferentes disponibilidades hídricas de las estrategias, provocaron la baja correlación con respecto a la radiación solar incidente durante la etapa V, como se observa en la Figura 13a.

Durante la etapa de FL la estrategia de RDC en FL+PC mostró bajos valores de transpiración al inicio de la FL, producto de retraso en el riego de 8 días. Los menores valores durante la FL los obtuvieron las estrategias de RDC PC y RDC V+PC, producto de deficiencias hídricas inducidas durante esta etapa siendo 80 y 44% menor al volumen transpirado por RT, respectivamente. Así mismo el RD también presentó menores volúmenes de transpiración durante esta etapa siendo un 17% menor con respecto al RT, producto de las menores láminas de riego aplicadas y las escasas PP durante esta etapa (Fig. 7). Estas variaciones de volúmenes de transpiración diaria durante esta etapa, producto principalmente de las diferentes disponibilidades hídricas obtenidas por cada estrategia de riego, provocan la baja correlación con la radiación solar incidente, como se observa en la Figura 13b.

Al igual que en el maíz durante el PC, no existieron diferencias de transpiración en las diferentes estrategias evaluadas ya que se contó con bienestar hídrico durante esta etapa, las variaciones obtenidas son producto principalmente de la radiación solar diaria, obteniendo una alta relación entre las variables, como se observa en la Figura 13c.

3.5.2. Pérdidas de agua en el suelo por percolación, escurrimiento, y evaporación

3.5.2.1. Maíz

En la Figura 14, se puede observar las pérdidas de agua por percolación estimadas por el modelo SIMDualKC, de las diferentes estrategias de riego evaluadas en maíz en la etapa V, PC y LLG. Como percolación el modelo estima, todo flujo descendente en el suelo producto del exceso de agua infiltrada fuera de la zona radicular.

En la etapa V se destaca las mayores pérdidas por percolación en las estrategias regadas durante esta etapa, de RT y RDC V + FL encontradas en las primeras etapas del cultivo, producto de las PP ocurridas a fines de noviembre (Fig. 6), donde existió un 40% de pérdidas de agua, estas pérdidas se explican por el escaso crecimiento radicular y su escaso crecimiento aéreo. La estrategia de RD también presentó pérdidas por percolación siendo estas de menor magnitud, 20% de las PP, al estar el perfil del suelo con menor contenido de agua producto de aplicar la mitad de la lámina de riego que las estrategias anteriores mencionadas, pudiendo aprovechar con mayor eficiencia el agua proveniente de las PP.

Las estrategias de RDC PC y RDC PC+LLG, no presentaron pérdidas por percolación durante la etapa V ya que se presentaban bajo déficit hídricas inducidas. Cabe aclarar que en los primeros días del cultivo existieron pérdidas por percolación en todas las estrategias de riego por igual, producto de las PP y el riego aplicado para su correcta implantación, por lo cual se perdió por percolación un 90% del volumen de las PP.

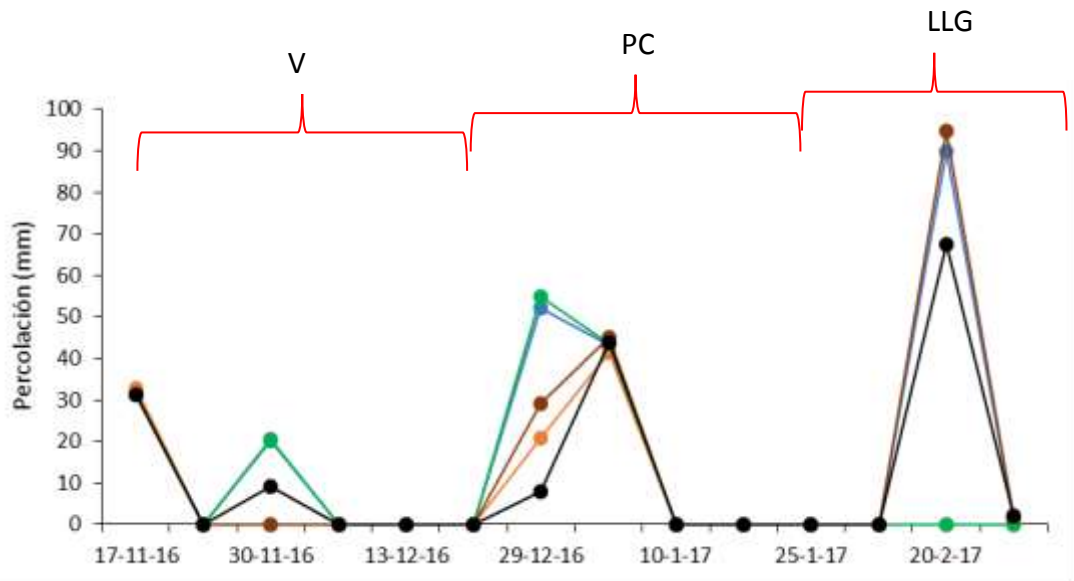


Figura 14. Evolución de las pérdidas de agua en el suelo por percolación (mm) estimadas por el modelo SIMDualKc en las diferentes estrategias de riego aplicadas en maíz. Riego total (línea azul), riego deficitario controlado en periodo crítico (línea anaranjada), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (línea verde), riego deficitario controlado en periodo crítico y llenado de granos (línea marrón) y riego deficitario 50% del riego total (línea negra). Llaves rojas hace referencia a diferentes etapas del ciclo del cultivo, etapa vegetativa (V), periodo crítico (PC) y llenado de granos (LLG).

Asimismo, en la Figura 14, se observan pérdidas por percolación al inicio del PC (V10) para todas las estrategias de riego, como consecuencia de las elevadas PP luego de las aplicaciones de riego (Fig. 6), obteniendo las mayores pérdidas de agua en el suelo en las estrategias RT y el RDC V+PC, siendo las pérdidas por percolación de 55% de las PP. Mientras que las demás estrategias de riego tenían el perfil de suelo con menor volumen de agua producto de las menores aplicaciones de riego hasta esa etapa, siendo de 32 y 23% de las PP para las estrategia de RDC PC+LLG y de RDC PC, respectivamente. Cabe destacar las menores pérdidas de agua por percolación para la estrategia de RD durante inicios del PC, debido a las menores

láminas de riego, esto permitió menores pérdidas de las PP, siendo las mismas de 9% de las mismas.

Se destaca en la Figura 14, durante el PC más avanzado (R1), las pérdidas de agua en el suelo por percolación iguales en todas las estrategias de riego, como resultado de un manejo del riego similar, por lo cual, el suelo contenía aproximadamente el mismo volumen agua en su perfil. Se obtuvo una estimación por percolación de 42% de las PP.

Por último, durante la etapa de LLG, se presentaron las pérdidas por percolación más elevadas, como consecuencia de las PP, cuyo volumen fue superior a 400 mm durante esta etapa (Fig. 3). Las pérdidas fueron de 25% de las PP en las estrategias RT y RDC PC+LLG y del 18% para RD. Estas menores pérdidas por percolación en la estrategia RD son consecuencia de las menores láminas de riego aplicadas.

En la Figura 15, se presenta la estimación de escurrimiento en las diferentes estrategias de riego. Se destacan dos escurrimientos puntuales, producto de saturación en el perfil de suelo.

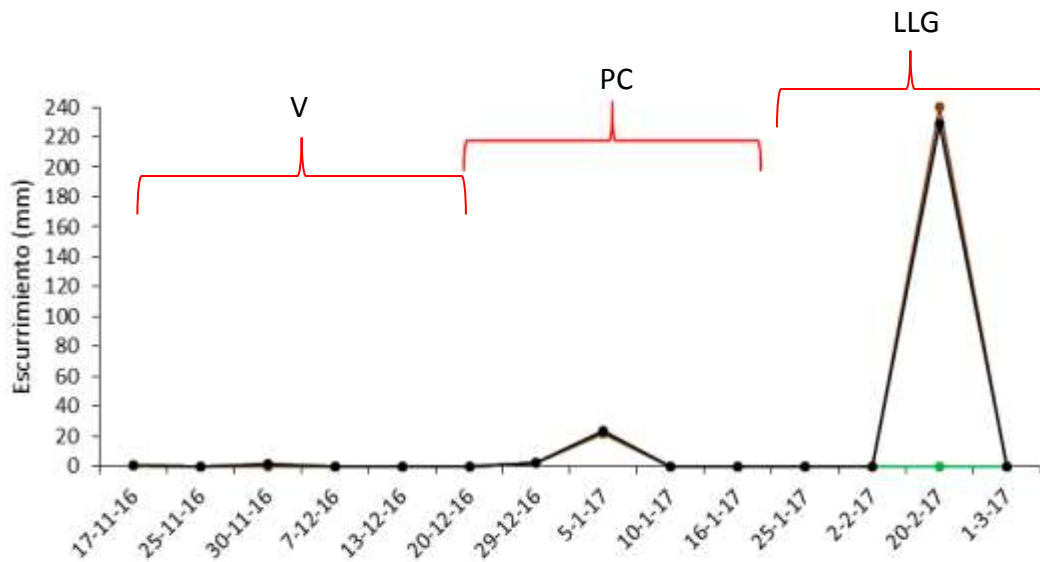


Figura 15. Estimación de la evolución de las pérdidas de agua en el suelo por escurrimiento (mm) estimadas por el modelo SIMDualKc, en las diferentes estrategias de riego aplicadas en maíz. Riego total (línea azul), riego deficitario controlado en periodo crítico (línea anaranjada), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (línea verde), riego deficitario controlado en periodo crítico y llenado de granos (línea marrón) y riego deficitario al 50% del riego total (línea negra). Llaves rojas hace referencia a diferentes etapas del ciclo del cultivo, etapa vegetativa (V), periodo crítico (PC) y llenado de granos (LLG).

En la etapa V, no se estimaron pérdidas por escurrimiento en ninguna de las estrategias de riego evaluadas, mientras que en el PC ocurrieron lluvias de intensidad y volumen mayores provocando pérdidas por escurrimiento del 25% de las PP en todas las estrategias de riego, ya que durante este periodo las mismas contaban con el mismo riego aplicado.

En el LLG se estimaron las pérdidas mayores por escurrimiento, producto de las PP ya mencionadas durante esta etapa fenológica de crecimiento, ocurridas en

las estrategias RT, RDC PC+LLG y RD, existiendo pérdidas de 65% de las PP, producto de estar el suelo saturado. Mientras que en las estrategias de RDC PC y RDC V+PC no existieron pérdidas por escurrimiento, ni por percolación durante esta etapa, ya que las mismas se encontraban bajo deficiencias hídricas.

En la Figura 16, se presentan las estimaciones de pérdidas por evaporación del suelo en las diferentes estrategias de riego en maíz. Las principales variaciones de evaporación son producto del riego aplicado en cada estrategia, obteniendo diferentes disponibilidades hídricas, y diferencias en la cobertura del canopeo según estrategia de riego. Se destaca la coincidencia con lo mencionado por Allen et al. (2006) quienes indican que en el momento de la siembra, casi el 100% de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90% de la ET ocurre por la transpiración.

Se observan los valores mayores durante el inicio de la etapa V en las estrategias regadas RT, RDC V+PC y RD, siendo de 65% de las PP, mientras que en las estrategias de RDC PC y RDC V+PC no existieron pérdidas por evaporación producto de contar con deficiencias hídricas durante esta etapa de crecimiento (Fig. 6). Cabe aclarar que a inicios del ciclo del cultivo, existieron pérdidas por evaporación para todas las estrategias producto de las PP ocurridas y riego aplicado en todas las estrategias por igual, como ya fue mencionado.

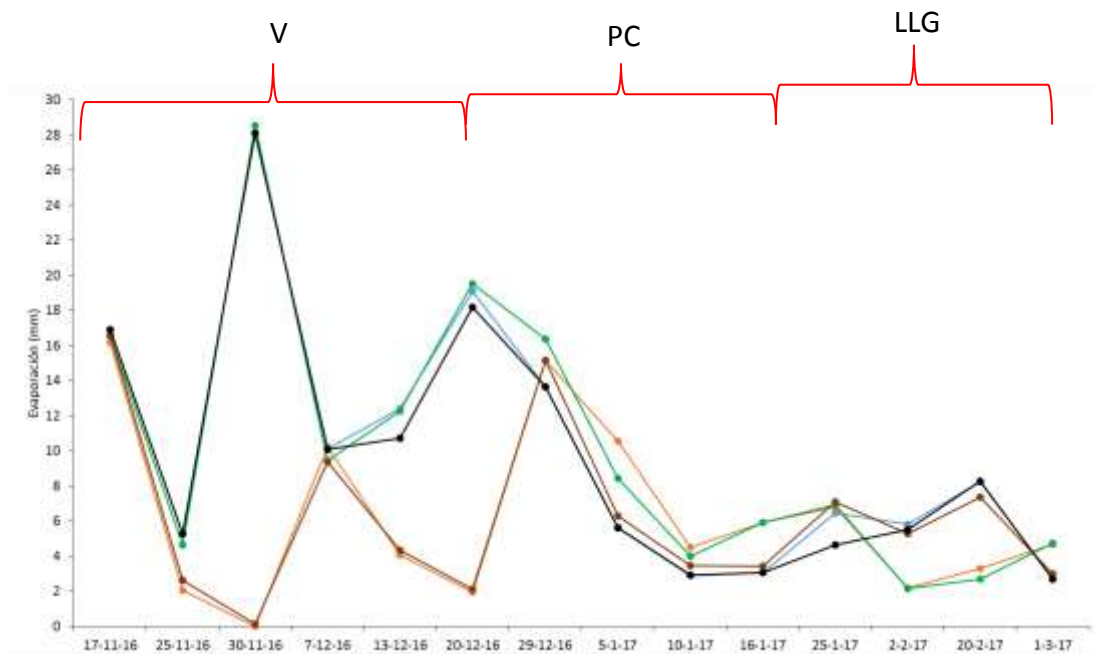


Figura 16. Estimación de la evolución de las pérdidas de agua en el suelo por evaporación (mm) estimadas por el modelo SIMDualKc, en las diferentes estrategias de riego aplicadas en maíz. Riego total (línea azul), riego deficitario controlado en periodo crítico (línea anaranjada), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (línea verde), riego deficitario controlado en periodo crítico y llenado de granos (línea marrón) y riego deficitario 50% del riego total (línea negra). Llaves rojas hace referencia a diferentes etapas del ciclo del cultivo, etapa vegetativa (V), periodo crítico (PC) y llenado de granos (LLG).

A inicios del PC, existieron diferencias en volúmenes de evaporación, siendo de 50% de las PP para las estrategias de riego RT, RDC V+PC y RD, y de 5% para las estrategias de RDC PC y RDC PC+LLG. Estas diferencias son consecuencia de las menores disponibilidades hídricas en RDC PC y RDC PC+LLG, producto de las deficiencias hídricas provocadas durante la etapa V (Fig. 6), teniendo un menor volumen de agua en el suelo al momento de las PP. Por el contrario, lo que ocurre

en el PC más avanzado (R1) donde se levantan dichas deficiencias hídricas y el manejo de riego es igual en todas las estrategias, obteniendo pérdidas por evaporación similares y del orden del 29% de las PP.

Durante la etapa de LLG, las diferencias de pérdidas de agua por evaporación fueron mínimas en todas las estrategias de riego, producto de lo mencionado por Allen et al. (2006), ya que el cultivo se encuentra completamente desarrollado y cubriendo en gran medida el suelo.

En el Cuadro 8, se presentan las pérdidas de agua totales estimadas en maíz por percolación, escurrimiento y evaporación, los cuales representaron el 60% aproximadamente del total del agua proveniente de las PP y el riego, no encontrándose grandes diferencias entre las estrategias de riego evaluadas. Por lo que, a pesar de disponer de diferentes disponibilidades hídricas durante el ciclo, las PP de la temporada provocaron pérdidas de agua aproximadas en proporción al volumen total de agua obtenido por cada estrategia de riego evaluada.

La estrategia de RDC V+PC fue la que mostró las pérdidas mayores en comparación al volumen de agua total disponible durante el ciclo, obteniendo 65% de pérdidas de agua y el RT el que obtuvo las menores con 57%. En cambio, en términos de valores absolutos la estrategia de de RT presentó las pérdidas mayores de agua, de los cuales el 78% fueron producto de la suma de percolación y escurrimiento por causa de las altas PP de la temporada (Fig. 6).

Cuadro 8. Estimación de la percolación (mm), el escurrimiento (mm), la evaporación (mm), la suma de estos componentes como total de pérdidas de agua en el suelo, precipitaciones totales (PP) y riego total, en las diferentes estrategias de riego en maíz. Riego total (RT), riego deficitario controlado en periodo crítico (RDC PC), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (RDC V+PC), riego deficitario controlado en periodo crítico y llenado de granos (RDC PC+LLG) y riego deficitario 50% del riego total (RD).

Estrategias de riego	Percolación (mm)	Escurrimiento (mm)	Evaporación (mm)	Total de pérdidas (mm)	PP (mm)	Riego (mm)	Total de PP + Riego (mm)
RT	238	258	140	636	805	259	1064
RDC PC	95	25	96	216	270	91	361
RDC V+PC	150	26	142	318	315	175	490
RDC PC+LG	202	265	86	553	715	175	890
RD	162	258	136	556	805	133	938

En las estrategias de riego evaluadas en general las pérdidas de agua mayores fueron por escurrimiento y percolación, siendo más elevadas las pérdidas por escurrimiento. Esto ocurrió a excepción, de las estrategias de RDC PC y RDC V+PC, debido a que en las mismas se interceptaron las PP de febrero que fueron las de volumen mayor, esto explica que las pérdidas de agua por escurrimiento fueran menores. Los valores de pérdidas obtenidos concuerdan con los expuestos por Dardanelli et al. (2010), estos autores obtuvieron pérdidas por escurrimiento del 30% del total de las PP, siendo uno de los principales factores de pérdida de agua. Así mismo, Trout y DeJonge (2017), reportaron pérdidas importantes por percolación profunda, en maíz irrigado de 80% de las PP en riegos totales y de 0% en cultivos regado al 40% del riego total, remarcando la importancia de los momentos y volúmenes de riego en relación a las pérdidas de agua. Sin embargo,

en el presente ensayo todas las estrategias de riego evaluadas presentaron pérdidas de agua proporcionalmente aproximadas como consecuencia de los volúmenes y distribución de PP de la temporada (Fig. 6).

3.5.2.2. **Soja**

En la Figura 17, se presentan las estimaciones de pérdidas de agua por percolación en soja, que al igual que en maíz ocurrieron principalmente por las PP durante el ciclo del cultivo. Se pueden observar diferencias de volúmenes de pérdidas por percolación entre las estrategias evaluadas, las cuales ocurrieron principalmente por diferentes disponibilidades de agua en el suelo al momento de ocurridas las PP. Como ya se ha observado las pérdidas de agua por debajo de la zona radical pueden llegar a ser muy importantes, en ocasiones se ha percolado hasta el 50% de las PP, por lo cual se destaca la importancia de establecer una buena planificación de riego con pronósticos meteorológicos de elevada exactitud.

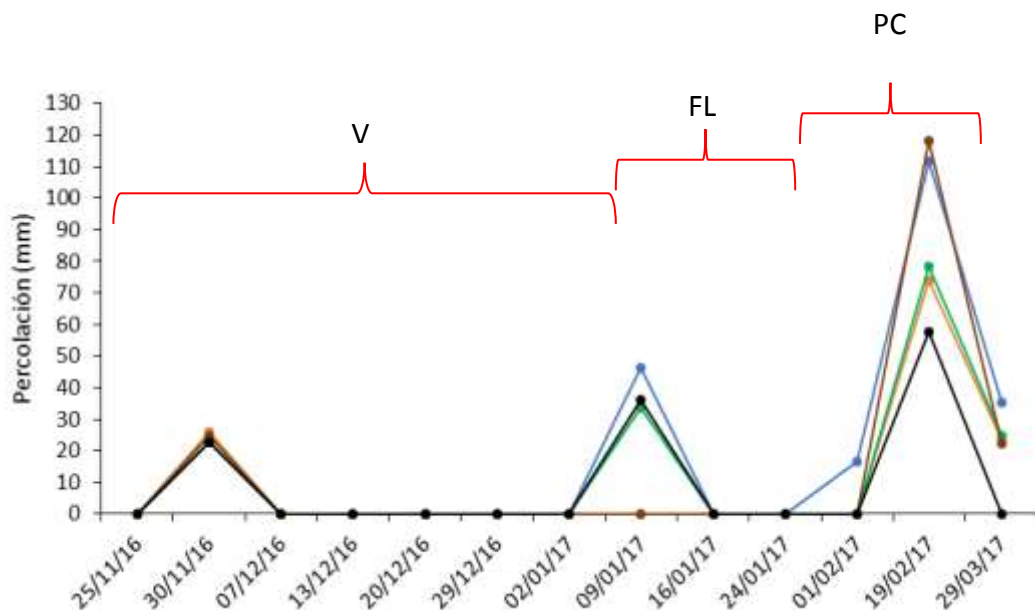


Figura 17. Estimación de la evolución de las pérdidas de agua en el suelo por percolación (mm) estimadas por el modelo SIMDualKc, en las diferentes estrategias de riego aplicadas en soja. Riego total (línea azul), riego deficitario controlado en periodo crítico (línea anaranjada), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (línea verde), riego deficitario controlado en floración y periodo crítico (línea marrón) y riego deficitario 50% del riego total (línea negra). Llaves rojas hace referencia a diferentes etapas del ciclo del cultivo, etapa vegetativa (V), periodo crítico (PC) y llenado de granos (LLG).

En la Figura 17, se puede observar que en las primeras etapas del cultivo existieron pérdidas por percolación producto de la ocurrencia de PP tempranas, encontrándose el cultivo en el inicio de la etapa V, por lo cual, no existieron diferencias entre estrategias de riego. Las pérdidas ocurrieron producto de la baja demanda de agua por el escaso crecimiento foliar y radicular, siendo del 54% de las PP.

También se observa en la Figura 17, que a fines de la etapa V y principios de la FL existieron diferencias entre las estrategias de riego implementadas, las mayores pérdidas por percolación durante este periodo se estimaron en la estrategia de RT,

con un 58% de las PP, mientras que las estrategias de RDC V+PC y RD mostraron 40 y 45% de pérdidas, respectivamente, la diferencia es producto de los volúmenes de agua en el suelo. El RDC PC y RDC FL+PC no presentaron pérdidas por percolación durante esta etapa, a la estrategia RDC PC se le indujo deficiencias hídricas durante esta etapa, mientras que en la estrategia RDC FL+PC presentaba el perfil de suelo con escaso contenido de agua, debido a las deficiencias hídricas durante la etapa V. Los valores obtenidos son sustancialmente mayores a los reportados por Dardanelli et al. (2010), en cultivos extensivos obtuvieron pérdidas máximas de 30% por percolación profunda, producto principalmente de las elevadas PP en la presente temporada, destacando nuevamente la importancia en la planificación del riego, para disminuir las pérdidas y hacer uso más eficiente de las PP.

Por último, durante el PC existieron las mayores pérdidas por percolación en todas las estrategias de riego, producto de las elevadas PP durante esta etapa, y difiriendo el volumen de pérdidas según su contenido hídrico en el suelo. Las estrategias de mayores pérdidas fueron las de RT y RDC FL+PC, siendo de 31% de las PP, al haber presentado riego durante FL y PC, por tanto el perfil estaba con un contenido hídrico mayor que las demás estrategias evaluadas. Mientras que el RDC PC y RDC V+PC al presentar deficiencias hídricas durante la etapa de FL mostró pérdidas menores, ya que el riego durante el PC no logró los volúmenes de las otras estrategias, siendo del 20% de las PP. Por último, en la estrategia de RD estimaron las pérdidas menores por percolación siendo del 15% de las PP, como consecuencia de la aplicación de láminas de riego menores.

En la Figura 18, se presentan las estimaciones de pérdidas de agua por escurrimiento en soja para las diferentes estrategias de riego evaluadas. Se puede observar que a fines de la etapa V existieron pérdidas por escurrimiento diferenciándose entre estrategias, siendo del 27% de las PP para las estrategias regadas durante esta etapa RT, RDC V+PC y RD, mientras que para las estrategias

RDC PC y RDC FL+PC no existieron pérdidas, ya que durante etapa V se les indujo deficiencias hídricas.

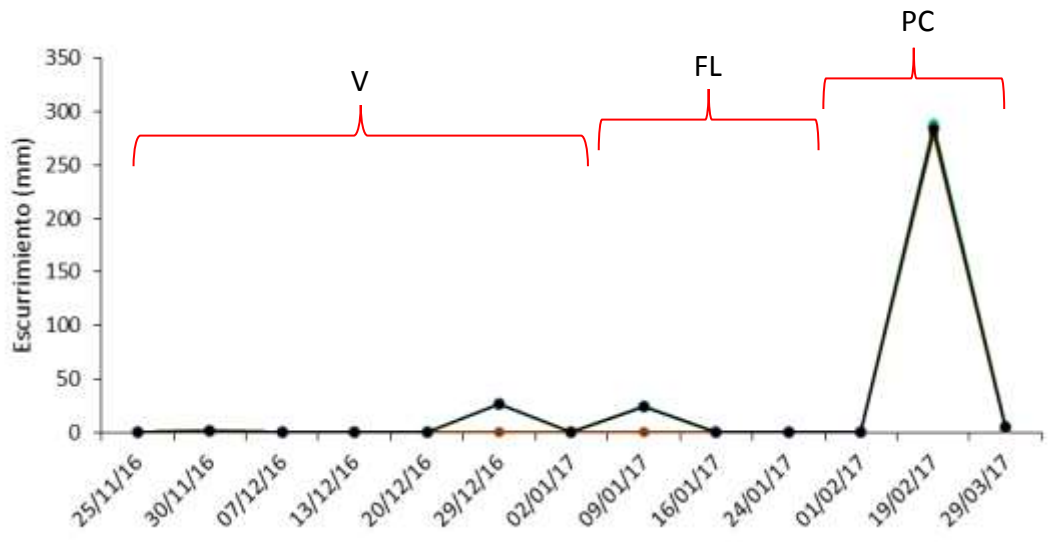


Figura 18. Estimación de la evolución de las pérdidas de agua en el suelo por escurrimiento (mm) estimadas por el modelo SimDualKc, en las diferentes estrategias de riego aplicadas en soja. Riego total (línea azul), riego deficitario controlado en periodo crítico (línea anaranjada), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (línea verde), riego deficitario controlado en floración y periodo crítico (línea marrón) y riego deficitario 50% del riego total (línea negra). Líneas rojas referencia diferentes etapas del ciclo del cultivo, etapa vegetativa (V), periodo crítico (PC) y llenado de granos (LLG).

A fines de la etapa V e inicios de la etapa de FL, también existieron diferencias en pérdidas por escurrimiento siendo del 23% de las PP, en las estrategias de RT, RDC V+PC y RD, mientras que para las estrategias RDC PC y RDC FL+PC no existieron pérdidas, producto del volumen hídrico escaso en el suelo al haber estado con deficiencias hídricas durante la etapa V.

Como se observa en la Figura 19, durante el PC ocurrieron las pérdidas mayores por escurrimiento, producto de las PP mayores ocurridas durante el ciclo (Fig. 7), no diferenciándose entre estrategias y siendo del 77% de las PP.

En la Figura 19, se presentan las estimaciones de pérdidas de agua por evaporación del suelo en soja para las diferentes estrategias de riego evaluadas. Como ya se mencionó, a principios de la etapa de crecimiento de los cultivos, una de las principales pérdidas de agua del sistema es producto de la evaporación del agua en el suelo, como consecuencia del escaso desarrollo vegetativo a inicios del cultivo (V2). Las pérdidas representan el 87% y 53% de las PP en todas las estrategias de riego, debido a las PP de a inicios de las etapa V y a que todas las estrategias disponían de riego. Sin embargo, en las etapas vegetativas más avanzadas como V4, existieron diferencias en las perdidas por evaporación en las diferentes estrategias, mientras que en RT, RDC V+PC y RD las pérdidas fueron de 44% de las PP, en RDC PC y RDC FL+PC fueron de 28%, estas menores pérdidas por evaporación son producto de tener un menor contenido hídrico en el suelo al momento de las PP, a causa de sus deficiencias hídricas durante la etapa V. Se destaca en la Figura 19 que durante el resto de la etapa V no existieron más pérdidas por evaporación en ninguna estrategia de riego, a causa del mayor desarrollo del conopeo cubriendo el suelo.

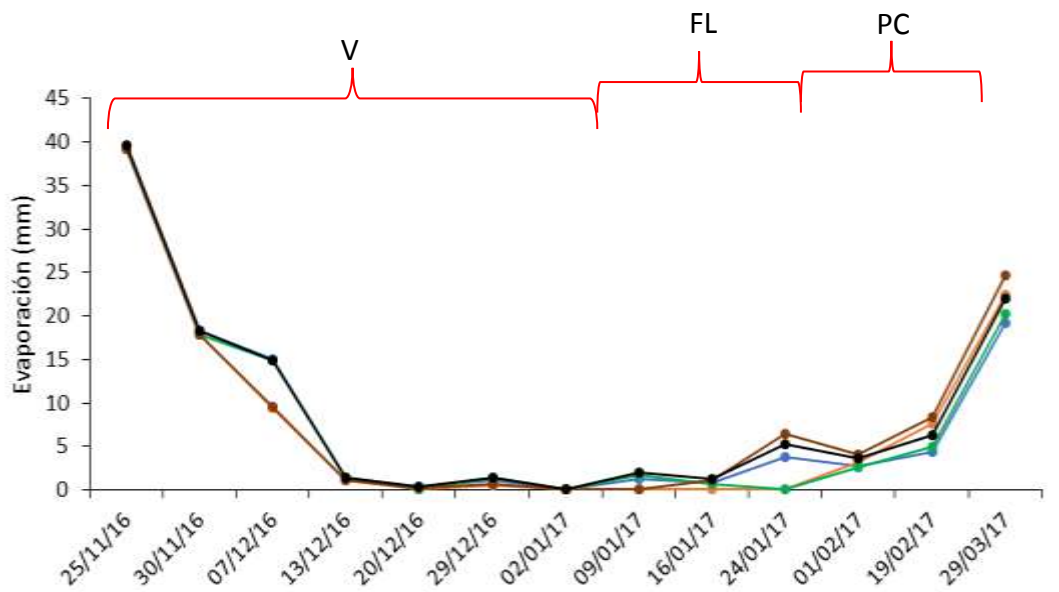


Figura 19. Estimación de la evolución de las pérdidas de agua en el suelo por evaporación (mm) estimadas por el modelo SIMDualKc, en las diferentes estrategias de riego aplicadas en soja. Riego total (línea azul), riego deficitario controlado en periodo crítico (línea anaranjada), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (línea verde), riego deficitario controlado en floración y periodo crítico (línea marrón) y riego deficitario al 50% del riego total (línea negra). Llaves rojas referencia diferentes etapas del ciclo del cultivo, etapa vegetativa (V), periodo crítico (PC) y llenado de granos (LLG).

En la etapa de FL, existieron pérdidas por evaporación al final de la misma, diferenciándose entre las estrategias evaluadas por su contenido hídrico en el suelo. En esta ocasión se identificó que las pérdidas fueron producto exclusivamente del riego al no existir PP durante este periodo (Fig. 7), siendo de 17% del riego aplicado en RT y del 8% en RDC FL+PC y RD, mientras que las estrategias de RDC PC y RDC V+PC no presentaban riego durante esta etapa, por lo cual no presentaron pérdidas.

En el fin de la etapa de PC, también existieron pérdidas por evaporación en las diferentes estrategias de riego como se observa en la Figura 19, no existiendo grandes diferencias entre las estrategias evaluadas producto de contar con

bienestar hídrico en todas ellas, las mismas fueron del 2% de las PP, estas bajas pérdidas porcentuales son consecuencias de las elevadas PP ocurridas durante esta etapa del cultivo (Fig. 7) y la elevada cobertura del canopeo.

En la Figura 19, se destaca además que los valores de pérdidas por evaporación fueron elevados a fines de ciclo (R7), producto de la senescencia natural de las hojas, por lo cual la cobertura fue menor, existiendo un mayor área de suelo descubierto, lo que provocó las mayores pérdidas de agua del suelo por evaporación durante este periodo, en todas las estrategias de riego evaluadas, siendo del 19% de las PP.

Una de las principales diferencias en comparación con maíz se encontró en las pérdidas de agua por evaporación durante su ciclo de crecimiento. El maíz es un cultivo erectófilo y con un menor coeficiente de extinción (Andrade et al., 2000), con una cobertura foliar en el suelo menor y de mayor variación con respecto a soja (Fig. 16 y 19), esto provoca mayores pérdidas de agua en el suelo por evaporación.

Cabe destacar que la evaporación estimada del suelo no aumentó con el incremento de la disponibilidad hídrica en ambos cultivos, a pesar de que el número de riegos y el volumen aplicado fue mayor, debido a que las estrategias que recibieron más riego también tuvieron un sombreado del suelo más temprano y mayor, por un dosel más grande. La evaporación estimada por esta metodología tendió a disminuir ligeramente con el aumento del riego, resultados similares reportaron Trout y DeJonge (2017), en cultivos de maíz.

En el Cuadro 9, se presentan las pérdidas de agua por percolación, escurrimiento y evaporación, las PP totales y riego total en soja para las diferentes estrategias evaluadas. Las mayores pérdidas de agua en el suelo fueron por percolación y escurrimiento al igual que en maíz, representando un 81% de las pérdidas, siendo de mayor importancia el escurrimiento con un 50%. Las pérdidas por escurrimiento en soja, fueron 23% mayores que las del maíz, producto de una

mayor aplicación de riego a fines de enero antes de las PP de mayores magnitudes ocurridas en febrero. Los valores de escurrimiento elevados sucedieron en todas las estrategias de riego, ya que las mayores PP ocurrieron en el PC del cultivo, donde todas las estrategias disponían de bienestar hídrico.

Cuadro 9. Estimación de la percolación (mm), el escurrimiento (mm), la evaporación (mm), la suma de estos componente como total pérdidas totales de agua en el suelo, precipitaciones totales (PP) y riego total, en las diferentes estrategias de riego en soja. Riego total (RT), riego deficitario controlado en periodo crítico (RDC PC), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (RDC V+PC), riego deficitario controlado en floración y periodo crítico (RDC FL+PC) y riego deficitario 50% del riego total (RD).

Estrategias de riego	Percolación (mm)	Escurrimiento (mm)	Evaporación (mm)	Total de pérdidas (mm)	PP (mm)	Riego (mm)	Total de PP + Riego
RT	232	342	108	682	887	286	1173
RDC PC	123	285	102	510	666	151	817
RDC V+PC	161	347	105	613	853	178	1031
RDC FL+PC	165	286	113	564	670	267	937
RD	116	341	117	574	857	152	1009

La estrategia de RT y la estrategia de RDC FL+PC fueron las que presentaron las mayores pérdidas por percolación y escurrimiento, con respecto a las PP ocurridas en cada estrategia, siendo el 66% de las mismas, mientras que el RD fue el de menores pérdidas representando el 57% de las PP las mismas fueron producto de la menor percolación obtenida principalmente al aplicar una menor lámina de riego sobre esta estrategia, siendo más eficiente en captar el agua de las PP, como fue mencionado anteriormente.

3.6. DEMANDA DE AGUA DEL CULTIVO Y EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR

3.6.1. Maíz

En el Cuadro 10, se presentan las ET en diferentes etapas del maíz como en el total del ciclo para las diferentes estrategias de riego evaluadas. Se observa que la estrategia de RT logró los máximos consumos hídricos, ya que la misma no presentó limitaciones hídricas durante su ciclo. Se destacó el consumo mayor durante la etapa de LLG, siendo un 39% del total consumido, producto principalmente de la duración de la etapa (45 días), presentando una radiación solar incidente promedio de $21,8 \text{ MJ.m}^{-2}\text{día}^{-1}$, en comparación al PC donde fue de una menor duración (32 días), y una radiación promedio similar $21,2 \text{ MJ.m}^{-2}\text{día}^{-1}$, correspondiendo a un 33% del total consumido. Mientras que durante la etapa V se obtuvo el menor consumo consecuencia del inicio de crecimiento y desarrollo foliar, a pesar de una radiación solar incidente promedio más alta de $26,5 \text{ MJ.m}^{-2}\text{día}^{-1}$, con una menor duración de la etapa (41 días), presentando menores demandas hídricas, siendo un 28% del total consumido.

En relación a la comparación entre las estrategias de riego evaluadas, la máxima diferencia se obtuvo entre la estrategia de RDC PC y RT, la cual consumió un 44% menos durante su ciclo que el RT, esto se debió a que fue la estrategia que presentó las restricciones hídricas mayores, ocurriendo estas en la etapa V y en el LLG. Se presentó un consumo 70% menor en la etapa V y un 58% menor en LLG al RT, mientras que durante el PC el consumo fue similar por presentar bienestar hídrico durante esta etapa del cultivo. Como se observa en la Figura 20, donde presenta la evolución del IAF y la ET en las estrategias de riego evaluadas, los bajos valores de IAF en etapa V en la estrategia RDC PC (Fig. 20b), teniendo como consecuencia este bajo consumo mencionado por la estrategia durante esta etapa, debido a las restricciones hídricas, obteniendo un valor de 2 IAF a inicios de PC, frente a un valor de IAF de 4 alcanzado por la estrategia de RT.

Cuadro 10. Estimación de consumo de agua a través de la evapotranspiración (ET, mm), en las etapas fenológicas de maíz, vegetativa (V), periodo crítico (PC) y llenado de granos (LLG), y en el ciclo total, en las estrategias de riego evaluadas. Riego total (RT), riego deficitario controlado en PC (RDC PC), riego deficitario controlado en etapa V y PC (RDC V+PC), riego deficitario controlado en PC y LLG (RDC PC+LLG) y riego deficitario 50% del riego total (RD).

Estrategias de riego	ET E-V10 (mm)	ET V10-R2 (mm)	ET R3-R6 (mm)	ET Total (mm)
RT	136	163	195	494
RDC PC	41	156	81	277
RDC V+PC	133	163	82	378
RDC PC+LLG	40	153	191	384
RD	117	153	167	437

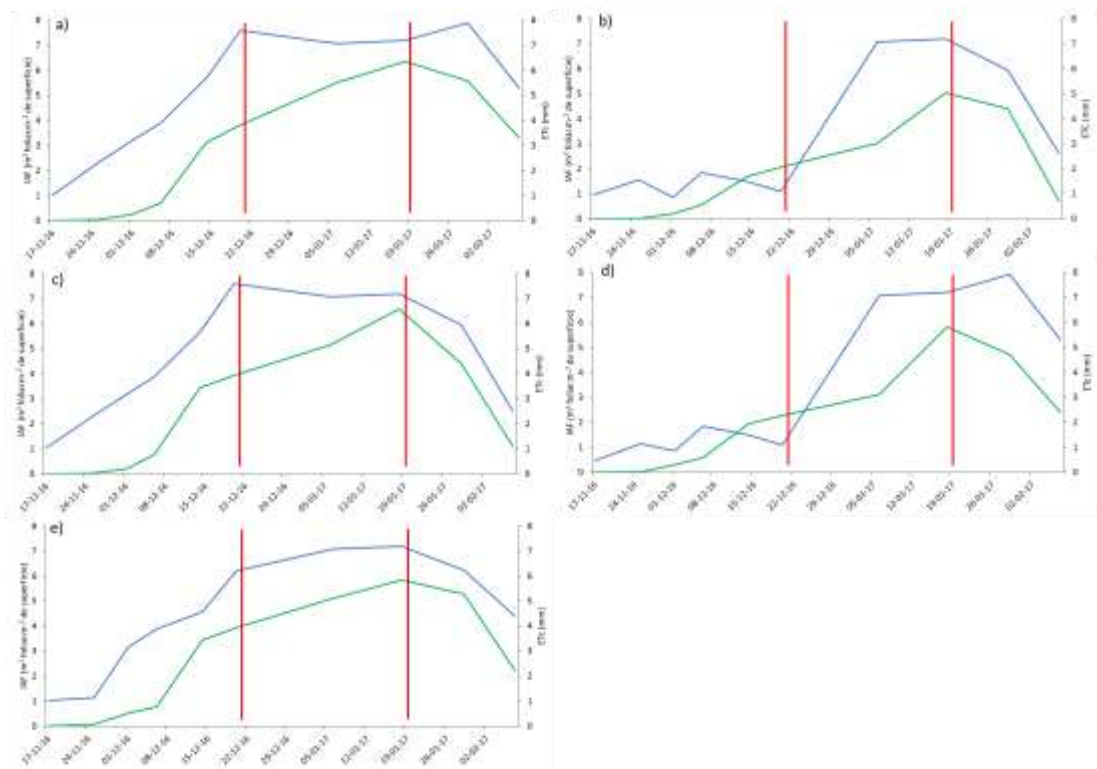


Figura 20. Evolución del índice de área foliar (m^2 de hoja. m^{-2} de suelo), línea verde, y de la evapotranspiración de maíz ($\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$), línea azul, en las estrategias de riego evaluadas. Riego total (a), riego deficitario controlado en periodo crítico (b), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (c), riego deficitario controlado en periodo crítico y llenado de granos (d) y riego deficitario 50% del riego total (e). Las líneas rojas indican inicio y final del periodo crítico.

Las estrategias de RDC V+PC y RDC PC+LLG mostraron un consumo menor al RT, del 23 y 22% respectivamente, en el ciclo total, diferenciándose las etapas donde ocurrieron los consumos hídricos menores producto de las deficiencias hídricas. El RDC V+PC mostró consumos similares en las etapas V y PC, y un menor consumo en LLG, que fue del 58% al presentado por RT, producto de sus deficiencias en el LLG. Mientras que la estrategia de RDC PC+LLG mostró un consumo menor durante la etapa V de 70%, presentando consumos similares durante el PC y LLG, debido a sus deficiencias hídricas durante la etapa V. Asimismo,

estos consumos hídricos concuerdan con los valores de IAF obtenidos por estas estrategias como se observa en las Figuras 20c y 20d, en la etapa V la estrategia de RDC en V+PC alcanzó valores de IAF de 4, aproximadamente mientras que la estrategia de RDC PC+LLG logró un IAF de 2.

En la Figura 20c y 20d, se puede observar que a fines del PC e inicios de LLG las estrategias RDC V+PC y RDC PC+LLG alcanzaron los máximos valores de IAF, siendo de 6,6 y de 5,8, respectivamente. La estrategia RDC V+PC alcanzó los máximos valores de IAF y los consumos de agua más elevados, sin embargo, en la etapa de LLG la disminución de IAF es más acentuada en esta estrategia producto de sus restricciones hídricas, alcanzando valores más bajos a R6 obteniendo un IAF de 1,1 en comparación a los 2,4 obtenidos por el RDC en PC + LLG. Los datos de IAF del presente trabajo se encuentran por encima del rango reportado por Maddonni et al. (1998) sembrados a una densidad de 70.000 plantas.ha⁻¹ y a los reportado por Stewart et al. (2003), quienes con densidades de 80.000 plantas.ha⁻¹, presentaron IAF en el rango de 1,53 a 4,65, producto principalmente de las menores poblaciones utilizadas.

En el Cuadro 10, se puede observar que la estrategia de RD que tiene una dependencia de las PP ocurridas, fue la que se aproximó más a los consumos del RT, se diferenció en un 11% en el ciclo total. A pesar que las aplicaciones de volúmenes de riego fueron la mitad del RT, consumió valores similares producto de las PP ocurridas (Fig. 7), diferenciándose en un 14% durante la etapa V y LLG, mientras que en el PC solo se diferenciaron en un 6% con respecto al RT, obteniendo una evolución del IAF similar (Fig. 20a y 20e).

Cabe destacar la correlación elevada que se alcanzó entre el IAF y la ET de cada estrategia evaluada, obteniendo un R² promedio de 0,78. Por lo que la disponibilidad hídrica, en cada estrategia de riego, condicionó significativamente el IAF y por lo cual su capacidad de interceptar radiación solar.

3.6.2. Soja

En el Cuadro 11, se presentan las ET en diferentes etapas de soja y en el ciclo total para las estrategias de riego evaluadas. Se puede observar que la estrategia de RT también fue, al igual que en maíz, la que alcanzó los máximos consumos en las diferentes etapas del cultivo y en el ciclo total. Capurro et al. (2017) obtuvo ET sustancialmente mayores en el sur y sur oeste de Uruguay de 622 a 682 mm en cultivos de soja sin restricciones hídricas, producto del ciclo de cultivo mayor debido a las temperaturas promedio menores, obteniendo mayores acumulaciones de radiación solar interceptada y demandas de agua. En relación a los valores de ET, como se puede observar en el Cuadro 11, los mayores se centraron en el PC, correspondiendo a un 31% del total, producto de una duración de 32 días, una radiación solar incidente de $17 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$. Mientras que la etapa V acumuló un 26% de la ET total, si bien el largo de la etapa es mayor (50 días) que el PC, presentó una radiación solar incidente similar de $18 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$, pero a causa de su inicio de desarrollo y crecimiento vegetativo, la ET fue menor. Por último, la etapa FL acumuló un 23% de la ET total, producto principalmente de la duración de la etapa de 20 días, presentando una elevada radiación solar $25 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$.

En el Cuadro 11, se puede ver que la estimación de consumo de agua total de la estrategia de RDC PC presentó los valores menores entre las estrategias evaluadas, consumiendo 38% menos que el RT, producto de las deficiencias hídricas durante etapa V y FL, consumiendo un 54 y 75% menos que lo estimado por el RT, respectivamente. Durante el PC estas diferencias se atenuaron debido al bienestar hídrico en esta etapa, estimando un consumo 23% menor que la estrategia de RT. A pesar de que el cultivo no presentó restricciones hídricas durante el PC, no llegó a obtener valores elevados de consumo, ya que el crecimiento foliar fue menor al inicio del PC debido a las deficiencias durante la etapa V que afectaron el crecimiento foliar. En la Figura 21, se presenta la evolución del IAF y ET en las

diferentes estrategias de riego evaluadas, donde se puede observar como el RDC PC logró un IAF 70% menor al alcanzado por el RT (Fig. 21a y 21b).

Cuadro 11. Estimación de consumo de agua a través de la evapotranspiración (ET, mm) en las diferentes etapas de crecimiento en soja, vegetativa (V), floración (FL), periodo crítico (PC), y en el ciclo total, en las estrategias de riego evaluadas. Riego total (RT), riego deficitario controlado en PC (RDC PC), riego deficitario controlado en etapa V y PC (RDC V+PC), riego deficitario controlado en FL y PC (RDC FL+PC) y riego deficitario 50% del riego total (RD).

Estrategias de riego	ET E-V8 (mm)	ET R1-R3 (mm)	ET R4-R6 (mm)	ET Total (mm)
RT	138	119	163	522
RDC PC	64	30	126	322
RDC V+PC	138	91	133	463
RDC FL+PC	64	74	159	399
RD	121	110	136	469

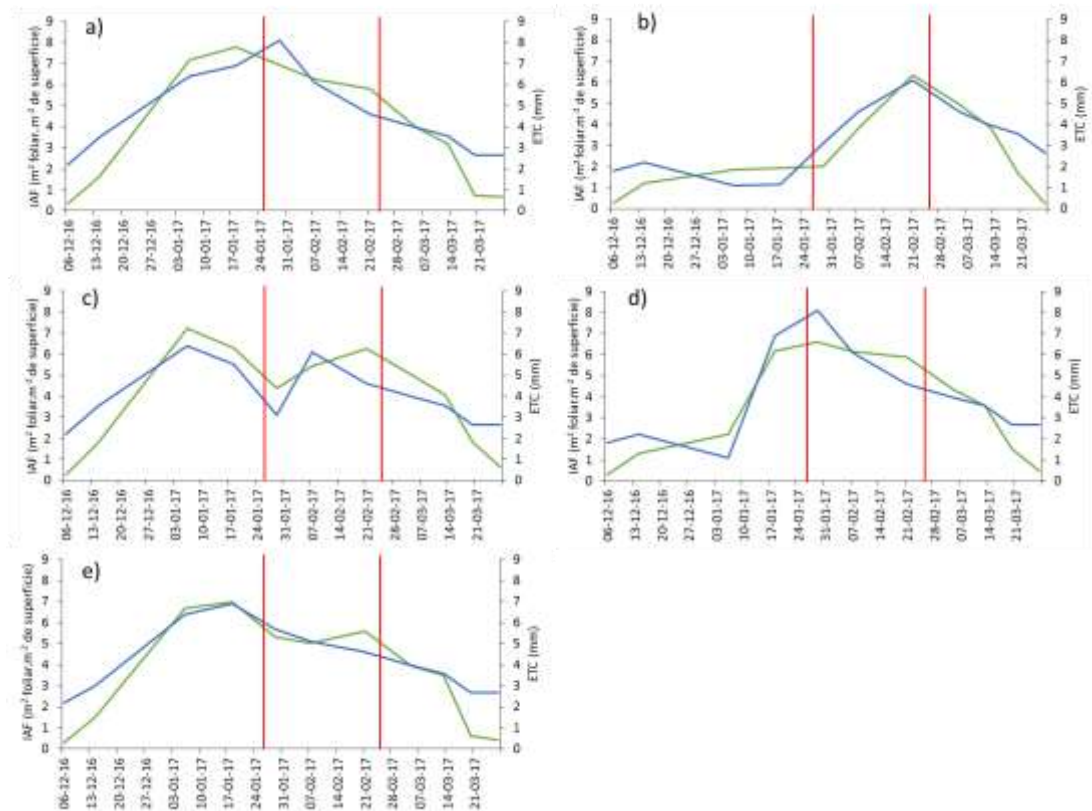


Figura 21. Evolución del índice de área foliar (m^2 de hoja. m^{-2} de suelo) línea verde y de la evapotranspiración del cultivo ($\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$) de soja, línea azul, en las estrategias de riego evaluadas, riego total (a), riego deficitario controlado en periodo crítico (b), riego deficitario controlado en periodo crítico y etapa vegetativa (c), riego deficitario controlado en floración y periodo crítico (d) y riego deficitario 50% del riego total (e). Las líneas rojas indican inicio y final del periodo crítico.

En comparación a la estrategia de RT, el RDC V+PC obtuvo un consumo estimado un 24% inferior durante la FL y un 11% inferior en todo el ciclo. Estas restricciones hídricas, durante inicios de la etapa reproductiva restringieron el consumo durante el PC, al observar una disminución del IAF a inicios del PC (Fig. 21c), siendo un 28% inferior al RT, obteniendo una ET 18% menor.

En el Cuadro 11, se destacan los valores estimados de ET mayores del RDC V+PC con respecto a RDC FL+PC, consecuencia del bienestar hídrico por esta

estrategia en su etapa V, alcanzando elevados valores de IAF (Fig. 21c), obteniendo un valor promedio de 58% superior. En cuanto a la etapa de FL, a pesar de contar con restricciones hídricas, mostró una estimación de consumo levemente superior con respecto a la estrategia RDC FL+PC, como consecuencia del bienestar hídrico durante la etapa V, que permitió producir una cantidad de follaje superior. Si bien los valores bajan durante la etapa de FL interpretando que no restringe significativamente el consumo.

En cuanto a la estrategia RDC FL+PC, mostró valores estimados de consumo de agua bajos, presentando un 24% menos que los alcanzados por la estrategia de RT en el ciclo total. En la Figura 21d, se pueden visualizar los valores de IAF bajos en la etapa V hasta inicios del estado reproductivo, siendo un 69% menor que la estrategia de RT, producto de las restricciones hídricas, presentando así mismo un 54% menor de ET. Estas restricciones, en la etapa V, provocaron un menor consumo estimado en la etapa de FL, producto de presentar a inicios de la misma escaso crecimiento vegetativo, obteniendo un valor de IAF 32% inferior al obtenido al RT durante esta etapa. En cambio esta misma estrategia (RDC FL+PC) durante el PC presentó valores similares al RT, visualizando que a inicios del mismo alcanzó los mayores niveles de IAF, consecuencia de las restricciones hídricas fueron levantadas a inicios de la etapa reproductiva, como se observe en la Figura 21d.

Por último, en el Cuadro 11 se observa que la estrategia de RD mostró valores de estimados de consumo 10% inferiores al RT, siendo la estrategia que más se aproximó al RT, ya que sus deficiencias hídricas durante el ciclo no presentaron la severidad al resto de las estrategias evaluadas. Se mostró una disminución del consumo estimado de agua de 18% con respecto al RT durante el PC, siendo la mayor diferencia en relación a las otras etapas fisiológicas, consecuencia de breves períodos de deficiencias hídricas durante la etapa de FL e inicios del PC (Fig. 7e). Como se observa en la Figura 21e, las deficiencias hídricas mencionadas provocaron

una leve disminución del IAF durante este período, siendo un 17% inferior que la cobertura alcanzada por el RT.

En la Figura 21, se destaca la alta correlación que se alcanzó entre la evolución de la cobertura del follaje y la estimación de ET de cada estrategia evaluada, obteniendo un R^2 promedio de 0,80. Por lo que la disponibilidad hídrica, en cada estrategia de riego, condicionó significativamente la cobertura del follaje y por lo cual su capacidad de interceptar radiación.

3.7. RADIACIÓN INTERCEPTADA Y PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA

3.7.1. Maíz

En los Cuadros 12 y 13, se presenta la acumulación de MS al inicio como al final del PC, la TCC diaria durante el PC y la acumulación de MS al final del ciclo para las diferentes estrategias de riego evaluadas en maíz, como también la radiación interceptada (RI) acumulada en cada etapa del cultivo y la RI total acumulada en todo el ciclo.

La estrategia de RT fue la de mayor producción de biomasa concordando con RI mayor de las estrategias evaluadas, mientras que el RDC PC fue el de menor producción de MS, logrando un 55% de lo alcanzado por RT. Coincidiendo a su vez con la menor RI durante todo el ciclo, siendo un 18% menor a lo acumulado por RT, esto fue consecuencia del menor IAF (Fig. 20b) tras las deficiencias hídricas en etapa V y LLG.

Cuadro 12. Materia seca (MS) ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) de maíz al inicio y final del periodo crítico (PC), final del ciclo y tasa de crecimiento del cultivo (TCC) durante el PC ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$) en las estrategias de riego evaluadas. Riego total (RT), riego deficitario controlado en PC (RDC PC), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y PC (RDC V+PC), riego deficitario controlado en PC y llenado de granos (RDC PC+LLG) y riego deficitario 50% del riego total (RD).

Estrategias de riego	MS al inicio del PC ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	MS al final del PC ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	TCC diaria durante el PC ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$)	MS al final del ciclo ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)
RT	4322 a	17392 a	384	19790 a
RDC PC	2982 c	13051 c	296	10902 d
RDC V+PC	4244 ab	16533 ab	361	15019 c
RDC PC+LLG	3108 bc	13293 bc	305	16694 bc
RD	4399 a	15497 abc	326	18058 ab

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

Cuadro 13. Radiación interceptada (RI) acumulada (MJ.m^{-2}) en maíz, durante la etapa vegetativa (emergencia a V10), durante el periodo crítico del cultivo (PC), durante llenado de granos (LLG), y en el total del ciclo, para las diferentes estrategias de riego evaluadas. Riego total (RT), riego deficitario controlado en PC (RDC PC), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y PC (RDC V+PC), riego deficitario controlado en PC y llenado de granos (RDC PC+LLG) y riego deficitario 50% del riego total (RD).

Estrategias de riego	RI E-V10 (MJ.m^{-2})	RI en PC (MJ.m^{-2})	RI en LLG (MJ.m^{-2})	RI en todo el ciclo (MJ.m^{-2})
RT	159 ab	271 a	340	769 a
RDC PC	114 c	221 b	298	632 b
RDC V+PC	163 ab	274 a	307	744 a
RDC PC+LLG	123 bc	225 b	310	658 ab
RD	171 a	262 a	331	765 a

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

En el Cuadro 12, se observa que al inicio del PC existieron diferencias significativas en acumulación de MS entre las estrategias evaluadas, esto se correlacionó con la disponibilidad hídrica al momento del muestreo, existiendo una reducción de la MS en la estrategia de RDC PC y RDC PC+LLG del 31% y del 29% con respecto a la estrategia de RT, respectivamente. Çakir (2004) presentó resultados similares en estudios realizados para evaluar los efectos de las deficiencias hídricas en maíz, el autor determinó que en la etapa V disminuyó la biomasa total entre 28 y 32% en relación con los tratamientos con RT.

En las Figuras 20b y 20d, se mostró que al principio del PC las estrategias RDC PC y RDC PC+LLG mostraban valores bajos de IAF con respecto a las demás estrategias de riego evaluadas. Se interpreta que esto fue consecuencia de una menor radiación interceptada y valores ET menores por las deficiencias hídricas,

mostrando menor transpiración estimada durante este periodo (Fig. 10). Esto produjo una menor acumulación de MS. Los resultados coinciden con los reportados por Otegui et al. (1995), los cuales aseguran que las deficiencias hídricas actúan sobre la cobertura del cultivo a través de la reducción en el crecimiento foliar, la aceleración de la senescencia y disminuye el área foliar activa. Esto reduce la proporción de radiación interceptada afectando negativamente la producción de biomasa.

En el Cuadro 12, se puede observar que al final del PC las diferencias en acumulación de MS se mantuvieron entre las estrategias de riego, si bien se levantan las restricciones hídricas durante el PC, las estrategias que sufrieron deficiencias hídricas durante la etapa V no se recuperaron, presentando una acumulación menor de biomasa con respecto al RT, la estrategia RDC PC mostró una disminución de 25% y la estrategia de RDC PC+LLG de 19%. Esta menor acumulación de MS es consecuencia de una RI durante el PC menor en ambas estrategias, evidenciándose en la evolución del IAF, como se mostró en las Figuras 20b y 20d. Esta misma tendencia fue encontrada por Zhang et al. (2019), Çakir (2004), NeSmith y Ritchie (1992), donde encontraron una reducción en altura, área foliar y crecimiento debido al riego deficitario aplicado durante la etapa V.

En el Cuadro 12, se observa además que las TCC durante el PC no mostraron diferencias significativas entre las diferentes estrategias de riego evaluadas, no obstante, se constató una tendencia ($p < 0,10$; Tukey) a una menor TCC en las estrategias de RDC PC y RDC PC+LLG obteniendo una TCC diaria 23 y 21% menor que el RT, respectivamente. Se interpreta que esta tendencia se debió a las deficiencias hídricas durante la etapa V, las que provocaron restricciones en el crecimiento foliar y por lo tanto en la interceptación de radiación y en definitiva una acumulación de MS menor al finalizar el PC.

En el Cuadro 12, se observa además que al fin del ciclo las diferencias en acumulación de MS entre estrategias se acentuaron. Se constataron las diferencias mayores entre las estrategia de RT y RDC PC, esta última presentó un 45% menos de MS acumulada, esto coincidió con la RI menor en el ciclo. La estrategia RDC V+PC presentó una reducción de 24% de acumulación de MS total con respecto al RT, producto de sus deficiencias durante el LLG. Mientras que la estrategia de RDC en PC+LLG, obtuvo una reducción menor de MS, de solo 16%, por lo cual, se destaca la importancia del riego durante el LLG en la acumulación de MS total.

Cabe destacar que tanto el RDC PC como el RDC V+PC, producto de las deficiencias hídricas presentaron un acortamiento del ciclo, disminuyendo el largo de la etapa de LLG en 6 días, esto también justifica los valores de ET menores durante esta etapa (Fig. 20b y 20c) y la menor acumulación de MS. Comas et al. (2019) reportaron resultados similares, observando que el déficit hídrico durante etapas reproductivas tardías acelera la senescencia, reduce la fotosíntesis y da como resultado el acortamiento de la etapa de LLG.

Por último, como también se observa en el Cuadro 12, la estrategia de RD no presentó diferencias en biomasa acumulada final con respecto al RT, alcanzado los máximos valores del ensayo con menor aplicación de riego. En la Figura 20e, se puede observar que los valores de IAF del RD fueron los más altos de las estrategias evaluadas en conjunto con la ET, producto de no haber presentado deficiencias hídricas severas durante el ciclo del cultivo.

3.7.2. **Soja**

En el Cuadro 14, se presentan la acumulación de MS en soja tanto al inicio como al final del PC y la TCC, para las diferentes estrategias de riego evaluadas. Se puede observar que existieron diferencias significativas en acumulación de MS al igual que en maíz, en las diferentes estrategias de riego, tanto al inicio como al final del PC.

En el Cuadro 15, se presentan las RI en diferentes etapas del cultivo y en el total del ciclo para las distintas estrategias de riego evaluadas, observando diferencias en todas las etapas del ciclo.

Cuadro 14. Materia seca (MS) acumulada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) de soja al inicio y final del periodo crítico (PC), y tasa de crecimiento del cultivo (TCC) diaria durante el PC ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$), para las estrategias de riego evaluadas. Riego total (RT), riego deficitario controlado en PC (RDC PC), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y PC (RDC V+PC), riego deficitario controlado en floración y PC (RDC FL+PC) y riego deficitario 50% del riego total (RD).

Estrategias de riego	MS al inicio del PC ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	MS al final del PC ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	TCC diaria ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$)
RT	9009 a	15237 ab	178 ab
RDC PC	4662 b	11155 c	186 ab
RDC V+PC	7512 ab	16484 a	256 a
RDC FL+PC	6542 ab	10954 c	120 b
RD	7805 ab	12591 bc	137 ab

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

Cuadro 15. Radiación intercepta (RI) acumulada (MJ.m^{-2}) en soja, en etapa vegetativa (desde emergencia a R1), floración (R1 a R4), el periodo crítico (PC) del cultivo, y en el ciclo total para las estrategias de riego evaluadas. Riego total (RT), riego deficitario controlado en PC (RDC PC), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y PC (RDC V+PC), riego deficitario controlado en floración y PC (RDC FL+PC) y riego deficitario 50% del riego total (RD).

Estrategias de riego	RI de E-R1 (MJ.m^{-2})	RI de R1-R4 (MJ.m^{-2})	RI en PC (MJ.m^{-2})	RI de emergencia a R6 (MJ.m^{-2})
RT	226 a	240 a	245 a	698 a
RDC PC	150 c	174 c	192 b	507 c
RDC V+PC	223 a	228 ab	229 a	668 ab
RDC FL+PC	163 bc	206 b	245 a	601 b
RD	210 ab	237 a	235 a	670 ab

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

En el Cuadro 14, se observa que al principio del PC existieron diferencias entre estrategias en la acumulación de MS, siendo RT la estrategia que presentó de acumulación de MS mayor, coincidiendo con la mayor RI tanto en la etapa V como en FL. En contrapartida, la estrategia de RDC PC fue la de menor acumulación de MS, mostrando una reducción de 48% con respecto al RT. En el Cuadro 15, se observa la menor capacidad que presentó la estrategia RDC PC de interceptar radiación, producto del escaso crecimiento vegetativo. Cabe destacar que la altura de planta promedio fue de 0,61 m para el RDC PC, siendo 0,35 m menor al RT (datos no presentados). Esto concuerda con trabajos realizados por Desclaux et al. (2000), donde evaluaron dos intensidades de deficiencias hídricas entre V4 y R1, reportando que las únicas variables que fueron afectadas eran la longitud de los entrenudos y la altura de planta, dando lugar a una menor acumulación de MS. Estos menores valores de MS, también fueron resultado de un IAF bajo al comienzo

del PC, se observa en la Figura 21b, un valor de IAF de 2, que permitió interceptar solo el 67% de la RI, acompañado de bajos valores de ET en consecuencia del crecimiento foliar menor como producto de las deficiencias hídricas ocurridas durante las etapas V y FL.

En relación a las demás estrategias de riego evaluadas, no existieron diferencias en la MS acumulada a inicios de PC con respecto al RT como se observa en el Cuadro 14. Así mismo, existió una tendencia a una menor acumulación de MS en la estrategia de RDC FL+PC, siendo 27% menor a la acumulada por RT. La altura de planta fue 0,27 m menor que la alcanzada por la estrategia de RT al inicio del PC (datos no presentados). A su vez, la RI fue menor tanto en etapa V como en FL, como se observa en el Cuadro 15, interceptando un 28 y 14% menos radiación con respecto al RT, respectivamente. Si bien el IAF y la ET, presentaron valores aproximados al RT a inicios de FL (Fig. 21d), la menor MS a inicios de PC provocó que no fuera posible la recuperación de las deficiencias hídricas provocadas en etapa V, limitando por su producción de follaje. Este comportamiento demuestra que la plasticidad de soja, no es bajo cualquier situación, la disponibilidad hídrica durante la etapa V es de importancia significativa para establecer la posibilidad de recuperarse ante deficiencias hídricas en etapas fenológicas posteriores.

En la estrategia de RDC V+PC, a partir de R1 el IAF empieza a disminuir, hasta inicios del PC (R4), observado en la Figura 21c, producto de las deficiencias hídricas durante esta etapa, sin embargo, no provocó disminuciones en la producción de biomasa, ni en la capacidad de interceptar radiación.

En el Cuadro 14, se observa que al final del PC existieron diferencias entre las estrategias evaluadas, observando una menor producción de MS en las estrategias RDC PC y RDC FL+PC, con 27 y 28% menor producción de MS con respecto al RT. Esta menor acumulación de MS tanto en la estrategia de RDC PC como en RDC FL+PC, es consecuencia directa de las deficiencias hídricas en la etapa

V, produciendo crecimiento foliar menor, RI menor durante todo el ciclo y fuente menor para la etapa de LLG.

Cabe mencionar que la estrategia de RD también se diferenció de las estrategias de mayor producción de biomasa a fines del PC. Se observa en el Cuadro 14 que si bien las deficiencias hídricas durante el ciclo del cultivo no fueron severas, como consecuencia de PP abundantes, existieron periodos en los que el porcentaje de AD en el suelo estuvo por debajo de los umbrales hídricos (Fig. 7e), tanto en la etapa V como en la FL e inicios del PC, destacando que existió un periodo de aproximadamente 18% del tiempo por debajo de los umbrales durante el PC. Esto produjo valores de MS menores al final de este período. Sin embargo, la RI y el IAF no fueron afectados, como consecuencia del bienestar hídrico en las etapas no críticas del ciclo que le permitió desarrollar una buena cobertura foliar, como se mostró en la Figura 21e.

En relación a la TCC, se observaron diferencias entre estrategias de riego, los valores menores se detectaron en la estrategia de RDC FL+PC. Las deficiencias hídricas durante la etapa V afectaron la acumulación de MS, mostrando menores TCC durante el PC. Se diferenció de la estrategia de RDC PC, ya que la acumulación de MS a inicios del PC fue menor en esta estrategia, teniendo la posibilidad de acumular más MS durante este periodo, finalizando con valores iguales en acumulación de MS a R6.

3.8. EFICIENCIA DE USO DE LA RADIACIÓN

3.8.1. Maíz

En el Cuadro 16, se presenta la EUR en diferentes etapas del maíz y en el ciclo total para las estrategias de riego evaluadas. Se puede observar que las menores acumulaciones de biomasa expuestas anteriormente de las estrategias RDC PC y RDC PC+LLG, tanto al inicio como al final del PC, no se tradujeron a una EUR menor,

producto de presentar una menor RI durante el PC, por lo cual la menor acumulación de MS se logró con una menor RI en estas estrategias de riego.

Cuadro 16. Eficiencia de uso de la Radiación (EUR, g.MJ⁻¹) en maíz, en la etapa vegetativa (V), periodo crítico (PC) y ciclo total, para las estrategias de riego evaluadas. Riego total (RT), riego deficitario controlado en PC (RDC PC), riego deficitario controlado en etapa V y PC (RDC V+PC), riego deficitario controlado en PC y llenado de granos (RDC PC+LLG) y riego deficitario 50% del riego total (RD).

Estrategias de riego	EUR (g. MJ ⁻¹)	EUR (g. MJ ⁻¹)	EUR (g. MJ ⁻¹)
	etapa vegetativa	en PC	en el ciclo total
RT	2,72	4,83	2,57 a
RDC PC	2,61	4,56	1,72 b
RDC V+PC	2,60	4,49	2,02 ab
RDC PC+LLG	2,54	4,92	2,54 a
RD	2,57	4,23	2,36 ab

Valores con igual letra no difieren entre sí (p<0,05; Tukey).

En relación a la EUR en el total de ciclo existieron diferencias, como se observa en el Cuadro 16, obteniendo las máximas EUR en las estrategias de RT y RDC PC+LLG, por lo que a pesar de las deficiencias hídricas en la etapa V esta estrategia mostró un uso más eficiente de la RI, al igual que el RD. Sin embargo, el RDC V+PC presentó una menor EUR siendo 0,55 g.MJ⁻¹ menor a RT (p<0,10; Tuckey), se interpreta este resultado como consecuencia de las deficiencias hídricas ocurridas durante el LLG, ya que durante esta etapa no existieron diferencias entre estrategias en RI. Se comprueba la relevancia del LLG al observar que la estrategia de RDC en PC obtuvo la menor EUR, que implicó un 33% menor que RT, esto pudo ser el motivo de una senescencia temprana producto de las deficiencias hídricas en ambas estrategias durante esta

etapa de crecimiento, incluso llevó a anticipar la cosecha en 6 días en relación al resto de las estrategias de riego evaluadas, como ya fue mencionado (Cuadro 4).

3.8.2. Soja

En el Cuadro 17, se presenta la EUR en las diferentes etapas de soja y para el ciclo total, en las estrategias de riego evaluadas. Se puede observar que no existieron diferencias entre las estrategias de riego en cuanto a EUR durante la etapa V y FL (E-R4), por lo que las diferencias encontradas de acumulación de MS no fueron producto de una menor eficiencia de uso, sino de valores de IAF menores a causa de las deficiencias hídricas y como consecuencia de una RI menor.

Cuadro 17. Eficiencia de uso de la Radiación (EUR) en soja, desde emergencia a inicios de periodo crítico (VE-R4), durante el periodo crítico (PC) y ciclo total, en las estrategias de riego evaluadas. Riego total (RT), riego deficitario controlado en PC (RDC PC), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y PC (RDC V+PC), riego deficitario controlado en floración y PC (RDC FL+PC) y riego deficitario 50% del riego total (RD).

Estrategias de riego	EUR (g. MJ ⁻¹) E-R4	EUR (g. MJ ⁻¹) en PC	EUR (g. MJ ⁻¹) en el ciclo total
RT	1,99	2,54 ab	2,19 ab
RDC PC	1,47	3,39 ab	2,20 ab
RDC V+PC	1,70	3,94 a	2,48 a
RDC FL+PC	1,82	1,73 b	1,79 b
RD	1,81	2,04 ab	1,88 ab

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

Se puede ver en el Cuadro 17, que en el PC y en el total del ciclo existieron diferencias entre las estrategias evaluadas, observando que la estrategia RDC V+PC no se diferenció del RT, por lo que las deficiencias durante la etapa de FL no

afectaron la eficiencia de utilización de la radiación solar para la conversión en biomasa. La cual también se pudo comprobar en la capacidad de interceptar radiación durante todo el ciclo (Cuadro 15). Del mismo modo, se comportó la estrategia de RDC PC no se diferenció del RT y RDC V+PC, ya que la acumulación de biomasa menor fue producto de una capacidad de interceptar radiación menor (Cuadro 15). En cuanto a la estrategia de RD, tampoco presentó diferencias tanto al inicio como al final del PC y en el ciclo total del cultivo. Por lo cual, la menor acumulación de biomasa a fines de PC no se tradujo en una menor EUR.

Sin embargo, la estrategia RDC FL+PC, se diferenció la EUR durante el PC y en el ciclo total, obteniendo valores menores, como consecuencia de una baja acumulación de biomasa a fines de PC y una elevada RI durante esta etapa del cultivo. Por tanto, se interpreta que las deficiencias hídricas durante la etapa V probablemente puedan estar limitando la capacidad de translocación de asimilados y su producción. En comparación con maíz, la soja es capaz de interceptar el 95% de la RFA con menor IAF como consecuencia del mayor coeficiente de extinción de la luz y la capacidad de ramificación (Andrade et al., 2000). Por lo cual, la soja puede estar interceptando gran cantidad de radiación y aun así obtener una baja acumulación de biomasa.

3.9. RENDIMIENTO EN GRANO, COMPONENTES Y SUB-COMPONENTES DEL RENDIMIENTO

3.9.1. Maíz

En la Figura 22, se presentan los rendimientos obtenidos para las diferentes estrategias de riego evaluadas. Se puede observar que existieron diferencias en rendimiento entre las diferentes estrategias de riego. La estrategia de RT fue la que presentó el mayor rendimiento, siendo similar el mismo a los rendimientos reportados por la investigación nacional e internacional en maíz sin limitantes hídricas (Hayashi y Dogliotti 2021, Zhang et al. 2019, Trout y DeJonge 2017, Djaman

e Irmak 2012, Giménez 2012). Mientras que la estrategia de RDC PC fue la de menor rendimiento, observándose el efecto del déficit hídrico en las etapas V y LLG, disminuyendo el rendimiento un 48% en relación a lo logrado por la estrategia RT. Por tanto, la estrategia de regar únicamente durante el PC afectó significativamente el rendimiento, ya que las deficiencias hídricas generaron una acumulación de biomasa menor y una capacidad de interceptar radiación menor, estando estos parámetros estrechamente relacionados con el rendimiento.

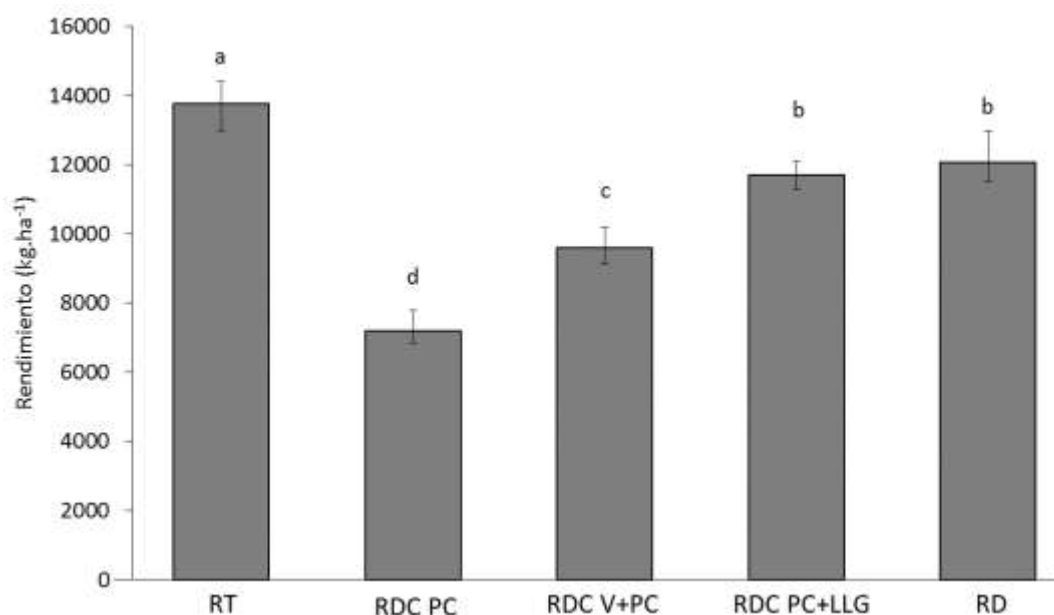


Figura 22. Rendimiento de maíz en grano (kg.ha⁻¹) para las estrategias de riego evaluadas. Riego total (RT), riego deficitario controlado en periodo crítico (RDC PC), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (RDC V+PC), riego deficitario controlado en periodo crítico y llenado de granos (RDC PC+LLG), riego deficitario 50% del riego total (RD). Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0,05$; Tukey).

En la Figura 22, se observa que la estrategia RDC V+PC mostró una disminución del rendimiento de 4.165 kg.ha⁻¹ en relación al RT, esto significó un detrimento del 30%. En tanto que la estrategia RDC PC+LLG presentó una reducción

del rendimiento de $2.065 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ significando 15% de pérdida de rendimiento en relación a RT. Los resultados concuerdan con los obtenidos por Çakir (2004) quien menciona que cuando el estrés hídrico se produce solo en las etapas V el efecto sobre los rendimientos es de menor magnitud, ya que no se afectan directamente los componentes principales del rendimiento. Sin embargo, cuando las deficiencias se produjeron durante el LLG se afectó el rendimiento en forma significativa, producto de reducir directamente un componente principal del rendimiento. Por lo cual, se destaca la importancia del riego durante la etapa de LLG. Los resultados reportados por Zhang et al. (2019) fueron similares a los logrados en este experimento, ratificando la importancia del agua en la etapa de LLG.

Por último, la estrategia de RD presentó una reducción de 12% en rendimiento con respecto al RT y conjunto a la estrategia de RDC PC+LLG, fueron las estrategias de riego sub-óptimo que lograron los rendimientos más altos luego del RT. Cabe mencionar que la estrategia de RD mostró un aporte hídrico significativo por las PP ocurridas en el año agrícola (Fig. 6e). Esta estrategia, mostró ser más eficiente en la captación de PP que el RT, no obstante, presentó periodos de deficiencias hídricas durante el ciclo del cultivo, demostrando ser dependiente de las PP. Sin embargo, en estudios similares llevados a cabo en el cinturón maicero de EE. UU., aplicando el modelo de simulación de riego denominado Deficit Irrigation Toolbox (DIT), el riego deficitario resultó el de más bajo en rendimiento en relación con estrategias de riego deficitarias controladas (Orduña et al., 2019). Se interpreta, que el comportamiento productivo del RD depende directamente de las PP de cada región y temporada agrícola. Las láminas de riego menores a las utilizadas en RT pueden causar deficiencias hídricas en etapas del ciclo de elevada importancia en la determinación del rendimiento o por el contrario en etapas de menor significancia productiva.

En la Figura 23, se presenta la relación entre rendimiento y el AD total efectiva para las estrategias de riego evaluadas, donde se observa que existió una relación

lineal entre las variables indicadas. Sin embargo, Kuscu et al. (2013), en estudios realizados en Turquía, encontraron una ecuación cuadrática entre ambas variables, mientras que en el presente experimento no se alcanzó un cambio de pendiente. Los máximos rendimientos se alcanzaron con 522 mm de AD efectiva en la estrategia de RT, mientras que con una reducción de 102 mm durante la etapa V y de 42 mm durante el ciclo del cultivo, fueron estrategias que alcanzaron los rendimientos más próximos al RT, en las estrategias RDC PC+LLG y RD, respectivamente. En cuanto a la estrategia de RDC V+PC mostró una reducción de 174 mm durante el LLG presentando una reducción de 30% del rendimiento en relación al relación al RT como ya fue expuesto, y la estrategia RDC PC con una reducción de 267 mm en etapas V y LLG presentó los rendimientos más bajos entre las estrategias evaluadas.

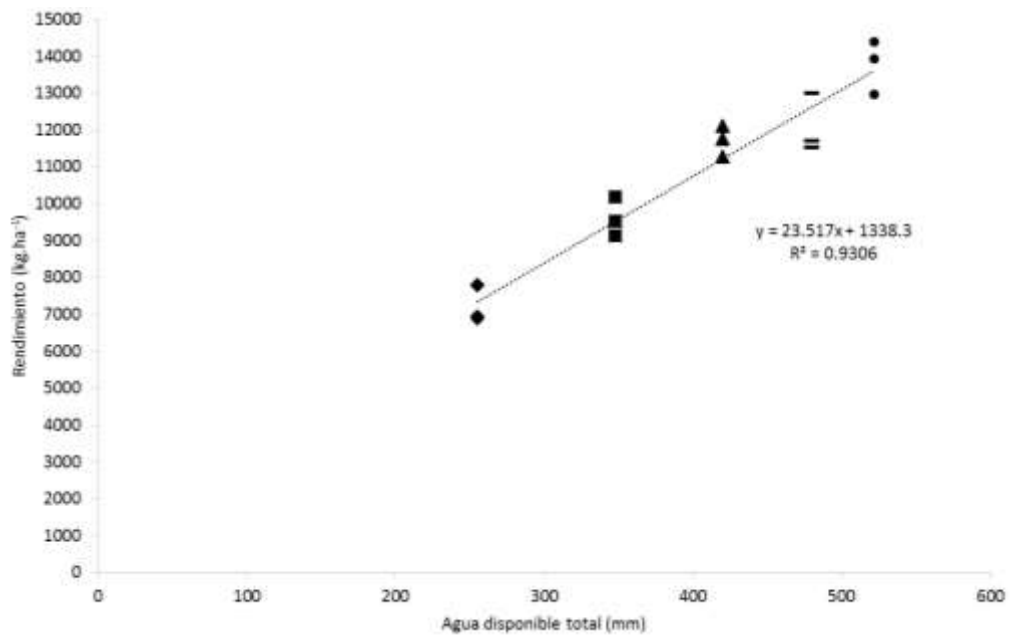


Figura 23. Rendimiento de maíz en grano (kg.ha⁻¹) según el agua disponible total efectiva (mm), para las estrategias de riego evaluadas. Riego total (círculos), riego deficitario controlado en periodo crítico (rombos), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (cuadrados), riego deficitario controlado en periodo crítico y llenado de granos (triángulos), riego deficitario 50% del riego total (líneas).

En el Cuadro 18, se presentan los componentes y subcomponentes principales del rendimiento en las diferentes estrategias de riego, las que explican los resultados obtenidos, existiendo diferencias entre estrategias en los componentes evaluados. Se puede observar en el Cuadro 18 que el RDC PC presentó una reducción de 24% en el número de granos por m² (NG) y 34% en el peso de granos (PG), en comparación con la estrategia de RT. Por lo que las deficiencias hídricas ocurridas durante el RDC PC afectaron con mayor magnitud el PG, esto es consecuencia de que durante el PC se presentó sin deficiencias hídricas en ambas estrategias, etapa en la que se determinó principalmente el NG.

Cuadro 18. Componentes numéricos (número de granos.m⁻² y peso de 1000 granos) y subcomponentes (número de hileras por espiga, número de granos por hilera y número de granos por espiga) de rendimiento en maíz según estrategia de riego evaluadas. Riego total (RT), riego deficitario controlado en periodo crítico (RDC PC), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (RDC V+PC), riego deficitario controlado en periodo crítico y llenado de granos (RDC PC+LLG), riego deficitario 50% del riego total (RD).

Estrategias de riego	Número de granos.m ⁻²	Peso de 1000 granos (g)	No. de hileras por espiga	No. granos por hilera	No. de granos por espiga
RT	5003 a	302 a	16.7 a	27 a	487 a
RDC PC	3799 c	197 b	15.4 b	22 c	367 c
RDC V+PC	5019 a	206 b	16.7 a	27 a	479 a
RDC PC+LLG	4186 b	306 a	16.0 ab	25 b	423 b
RD	4745 a	278 a	16.8 a	25 ab	465 ab

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

En la estrategia RDC V+PC, el principal componente del rendimiento afectado fue el PG producto de las deficiencias hídricas durante el LLG, las que provocaron una disminución de 32% en relación al RT. En cuanto al NG alcanzó los valores mayores al disponer de bienestar hídrico tanto en la etapa V como en el PC. En diferentes estudios, se ha indicado que el déficit hídrico luego de R3 puede resultar en una disminución del PG debido a la fotosíntesis reducida y la senescencia temprana de las hojas y a una etapa de LLG más corta (Zhang et al. 2019, Giménez 2012, Andrade y Sadras 2000, NeSmith y Ritchie 1992), concordando con los resultados obtenidos.

En cambio, en la estrategia de RDC PC+LLG el componente afectado fue el NG justificando la disminución del rendimiento, siendo la misma 16% menor que RT.

Por lo que a pesar de disponer de bienestar hídrico durante el PC, no mostró un NG elevado, ya que las deficiencias hídricas durante la etapa V, se interpreta que afectaron la capacidad de la fuente y por ello la capacidad fotosintética al interceptar menor radiación, esto probablemente haya condicionado el potencial de producción de granos durante el PC, tal como señalan Otegui y Bonhomme (1998). Mientras que en PG presentó los máximos valores alcanzados, al contar con bienestar hídrico durante el LLG y concretar menor NG, por menor capacidad de fosa, siendo una de las estrategias que más se aproximó al rendimiento alcanzado por RT

En el Cuadro 18, se observa que la estrategia de RD no presentó diferencias en NG y en PG con respecto a la estrategia de RT. EL RD es la estrategia que más se aproximó al rendimiento máximo alcanzado, producto de las escasas deficiencias hídricas obtenidas durante el ciclo (Fig. 6e), por las elevadas PP ocurridas.

Cabe destacar que el componente numérico principal que tuvo mayor correlación con el rendimiento fue el PG ($R^2=0,80$) en comparación al NG ($R^2=0,39$). Esto se debe a que en el presente trabajo a pesar de contar con bienestar hídrico durante el PC en todas las estrategias evaluadas, no todas alcanzaron los máximos rendimientos. La estrategia RDC V+PC, mostró un elevado NG, no traduciéndose a mayor rendimiento, producto de las deficiencias hídricas durante el LLG, que perjudicó el PG, por lo cual, no correlacionó el NG con el rendimiento final.

En el Cuadro 18, también se presentan los subcomponentes del rendimiento en las diferentes estrategias de riego evaluadas. En el caso de RDC PC, se diferenció en los subcomponentes evaluados con respecto al RT, mostrando una reducción del 8% en el número de hileras por espiga, del 19% con respecto al número de granos por hilera y del 25% con respecto al número de granos por espiga, siendo este último el subcomponente más afectado. De igual forma, en la estrategia de RDC PC+LLG el subcomponente más afectado y que justifica la merma de NG fue el

número de granos por espiga obteniendo una reducción del 13% con respecto al RT. Estos resultados concuerdan con la literatura, en cual mencionan que los procesos de generación de hileras por espiga y espiguillas por hilera son relativamente insensibles a variaciones ambientales y de manejo, siendo los subcomponentes de rendimiento menos afectados (Otegui, 2009). En cuanto a las estrategias RDC V+PC y RD no se diferenciaron del RT, obteniendo los máximos valores de los subcomponentes de rendimiento, lo que explicó el elevado NG.

3.9.2. Soja

En la Figura 24, se presentan los rendimientos en grano obtenidos por las diferentes estrategias de riego evaluadas en soja. La estrategia RT fue la que presentó los rendimientos mayores, siendo elevados en comparación a los reportados en la literatura regional e internacional en soja sin restricciones hídricas, existiendo escasos trabajos de investigación bajo riego que superan los 6500 kg.ha⁻¹ (Giménez 2014, Cooper 2003, Lawn et al. 1984, Flannery 1983).

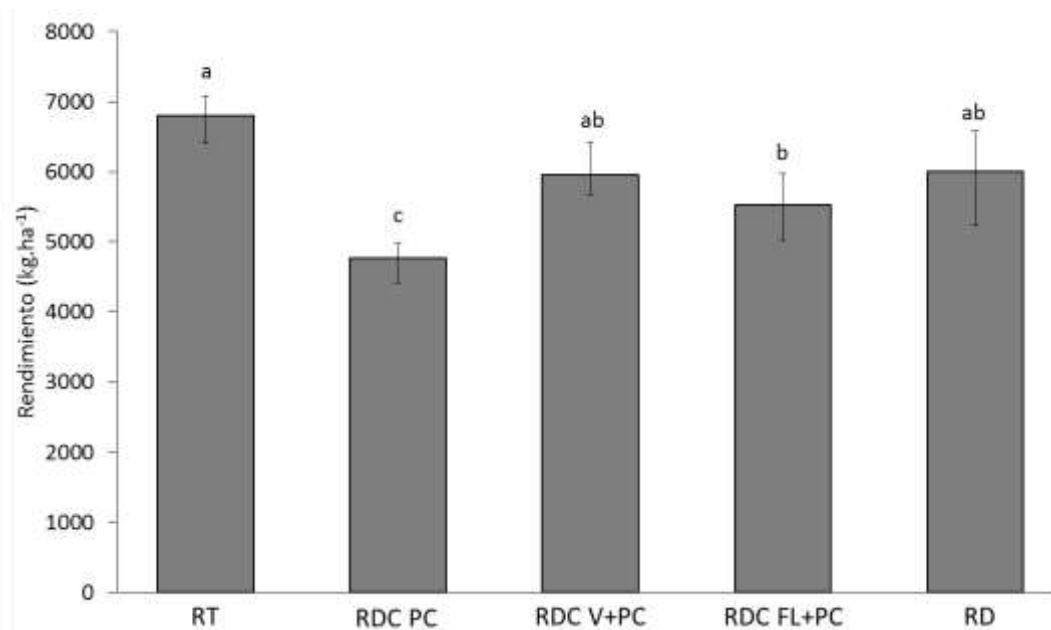


Figura 24. Rendimiento de soja en grano (kg.ha⁻¹) según estrategia de riego evaluada. Riego total (RT), riego deficitario controlado en periodo crítico (RDC PC), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (RDC V+PC), riego deficitario controlado en floración y periodo crítico (RDC FL+PC), riego deficitario 50% del riego total (RD). Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0,05$; Tukey).

La estrategia RDC PC presentó los rendimientos más bajos con una reducción de 2.033 kg.ha⁻¹, equivaliendo a una disminución del 30% con respecto al rendimiento alcanzado por RT. Las deficiencias hídricas ocasionadas durante las etapas V y FL, provocaron una menor acumulación de MS tanto al inicio como al final del PC (Cuadro 14), y una menor RI, afectando el rendimiento.

En cuanto a la estrategia de RDC FL+PC mostró un rendimiento 19% menor con respecto al RT, como se observa en la Figura 24. Las deficiencias hídricas durante la etapa V provocaron una baja capacidad de interceptar radiación durante esta etapa e incluso en la FL (Cuadro 15). En el PC, si bien aumentó la RI, la TCC fue baja lo que provocó la merma de rendimiento, esto a su vez se tradujo en una

menor EUR durante el PC (Cuadro 17), observando que estas restricciones hídricas durante la etapa V limitaron la capacidad de plasticidad por parte del cultivo. A diferencia de lo expuesto por Karam et al. (2005) quienes mencionan que en situaciones de deficiencias hídricas hasta R2, no se encontraron diferencias significativas con RT. Los resultados obtenidos indican en forma clara la importancia significativa del riego durante la etapa V.

Andrade y Sadras (2000) destacan la alta estabilidad del rendimiento de soja en respuesta al estrés entre las etapas R1 y R3, coincidiendo con los resultados del presente ensayo. La estrategia de RDC V+PC, en el cual se inducen deficiencias hídricas en la etapa de FL, no mostró diferencias significativas en rendimiento con la estrategia de RT, como se observa en la Figura 24. Esto probablemente puede estar explicado por el efecto de compensación característico de la soja, y de esta manera la estrategia RDC V+PC alcanzó los rendimientos obtenidos por RT con menores volúmenes de riego.

La estrategia de RD tampoco se diferenció de RT, este comportamiento fue consecuencia del aporte hídrico de las PP ocurridas durante el ciclo del cultivo (Fig. 7e) y la mayor captación de las mismas al regar con menores volúmenes de riego (50% del RT). Las características de las PP de la temporada, permitieron que la estrategia de RD mostrara un contenido de agua en el suelo superior a los umbrales de riego, en parte significativa del ciclo del cultivo y ocurriendo deficiencias hídricas de menor magnitud que el resto de las estrategias evaluadas.

En la Figura 25, se puede observar la relación entre el rendimiento en grano y el AD total efectiva para las estrategias de riego evaluadas, existiendo una relación lineal entre ambas variables. La relación entre el agua disponible y el rendimiento fue menor en soja ($R^2= 0,70$) que en maíz, debido a que la estrategia RDC en V + PC y RD obtuvieron valores muy similares de AD y menores a RT, obteniendo rendimientos aproximados, como se presentó en la Figura 24. Por lo cual, los

rendimientos máximos fueron alcanzados con 544, 498 y 509 mm de AD efectiva, destacando que una diferencia de 46 mm durante la etapa de FL, no afectó el rendimiento. Mientras que reducciones de 122 mm de AD efectiva durante la etapa V afectaron significativamente los rendimientos (RDC FL+PC) y de 211 mm en las etapas V y FL presentaron los rendimientos menores de las estrategias evaluadas (RDC PC), como ya fue mencionado.

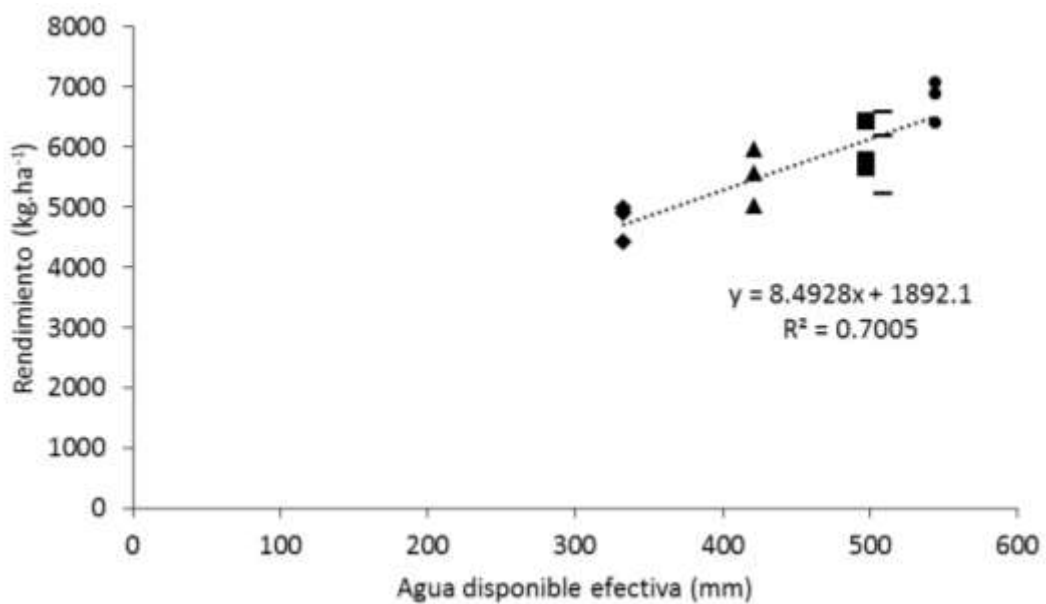


Figura 25. Rendimiento de soja en grano (kg.ha⁻¹) según el agua disponible total efectiva durante su ciclo (mm), para las diferentes estrategias de riego evaluadas. Riego total (círculos), riego deficitario controlado en periodo crítico (rombos), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (cuadrados), riego deficitario controlado en floración y periodo crítico (triángulos), riego deficitario 50% del riego total (líneas).

En el Cuadro 19, se presentan los principales componentes y subcomponentes del rendimiento en soja para las diferentes estrategias de riego. La estrategia RT, presentó un NG significativamente superior al RDC PC, no diferenciándose de las demás estrategias evaluadas. De igual manera, la estrategia RDC V+PC presentó un

PG alto, alcanzado al obtenido por RDC PC, que fue la estrategia que alcanzó el mayor PG. Por lo cual, las deficiencias hídricas en la etapa de FL no afectaron los componentes principales del rendimiento. Por lo que, la estrategia en que se regó únicamente durante las etapas V y PC mostró un IAF y una producción de MS elevada (Cuadro 14), como ya fue mencionado, esto permitió sobrellevar las deficiencias provocadas en FL, obteniendo durante esta etapa una captación de RI alta (Cuadro 15), concretando un número de vainas y de NG sin diferencias con el RT.

En el Cuadro 19, también se observa que la estrategia RDC PC fue la que mostró el menor NG, un 38% menos que el RT. Sin embargo, el PG fue significativamente superior a RT, siendo un 11% mayor, el cual no fue suficiente para contrarrestar el bajo NG. Por lo que regar solo en el PC, si bien mostró altos valores en PG, afectó el crecimiento foliar y la capacidad de interceptar radiación y esto se tradujo en menor NG que es el componente que correlaciona en forma más significativa con el rendimiento.

Cabe destacar que existió una correlación positiva entre el NG y el rendimiento en las diferentes estrategias de riego ($R^2=0,63$). Se puede afirmar que el NG es el factor más importante que afectó las variaciones en el rendimiento (Capurro 2016, Torrion et al. 2014, Wani et al. 2012, Karam et al. 2005). La relación entre los componentes numéricos del rendimiento fue negativa, por lo cual a medida que se incrementó el NG tendió a disminuir el PG, se obtuvo una correlación muy baja ($R^2=0,33$) entre el PG y el rendimiento.

Cuadro 19. Componentes (número de granos y peso de mil granos) y subcomponentes principales de rendimiento (número de vainas por planta, número de vainas por m² y número de granos por vaina) en soja según estrategias de riego evaluadas. Riego total (RT), riego deficitario controlado en periodo crítico (RDC PC), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (RDC V+PC), riego deficitario controlado en floración y periodo crítico (RDC FL+PC), riego deficitario 50% del riego total (RD).

Estrategias de riego	Peso de 1000 granos	Número de granos.m ⁻²	No. de vainas por planta	No. de vainas. m ⁻²	No. de granos por vaina
RT	150 b	4519 a	49 a	1724 a	2.6 a
RDC PC	167 a	2833 b	33 b	1143 b	2.3 c
RDC V+PC	160 ab	3875 ab	47 a	1567 ab	2.5 a
RDC FL+PC	154 b	3583 ab	41 ab	1441 ab	2.3 bc
RD	162 ab	3755 ab	38 ab	1526 ab	2.5 ab

Valores con igual letra no difieren entre sí (p<0,05; Tukey).

La estrategia de RDC FL+PC obtuvo un PG bajo, siendo un 8% menor que la estrategia de RDC en PC, conjunto con la combinación con NG, explicó el bajo rendimiento mostrado. En esta estrategia, se logró un bajo IAF, por lo cual una intercepción de radiación menor que RT (Cuadro 15), producto de las deficiencias hídricas ocurridas durante la etapa V que afectaron negativamente el PG. Por otra parte, se constató una TCC menor durante el PC (Cuadro 14), la cual no perjudicó de manera significativa al NG. Por lo que regar únicamente durante las etapas de FL y PC no logró los rendimientos mayores, debido a la afectación negativa del PG.

Por último, la estrategia de RD mostró un elevado NG, no diferenciándose del RT y a su vez un elevado PG, por lo que, mostró rendimientos similares al RT. Por lo

que las deficiencias por algunos periodos durante la etapa V como en FL (Fig. 7e), no afectaron ningún componente numérico principal de rendimiento.

En cuanto a los subcomponentes del rendimiento, la estrategia de RT presentó los máximos valores de vainas por planta, número de vainas por superficie y número de granos por vaina, no se diferenció de RDC V+PC, por lo que las deficiencias provocadas en FL no afectaron los subcomponentes del rendimiento, como se observa en Cuadro 19. La disponibilidad hídrica durante las etapas V y PC permitió compensar las deficiencias durante FL, logrando un IAF elevado y una intercepción de radiación que no se diferenció del RT (Cuadro 15), incluso durante FL, alcanzando la acumulación de MS suficiente para no afectar los subcomponentes del rendimiento.

La estrategia de RDC PC presentó los valores menores siendo el número de vainas por superficie y número de vainas por planta los subcomponente más afectados, mostrando una disminución de 34 y 33%, en relación al RT presentando el NG más bajo del ensayo. Los resultados concuerdan con los logrados por Kantolic et al. (2003), estos autores mencionan que las diferencias principales en el NG obedecen al número de vainas que se concretan. En relación al número de granos por vaina, fue el factor menos afectado, siendo un 12% menor al RT, ya que es un subcomponente estable dentro de una misma variedad de soja, debido al control genético como indican Kantolic y Slafer (2003). Así mismo, en la estrategia de RDC FL+PC presentó menor número de granos por vaina que RT, siendo un 12% inferior, no disminuyendo el NG.

En cuanto al RD, no se diferenció en ningún de los subcomponentes presentados en el Cuadro 19, en relación al RT. Por lo cual, se desprende de los resultados que las deficiencias hídricas moderadas por periodos cortos durante las etapas V, FL y PC (Fig. 7e), no redujeron el número de vainas por superficie ni el número de granos por planta.

3.10. EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA EN MAÍZ Y SOJA

En el Cuadro 20, se puede observar la EUA ($\text{kg}\cdot\text{mm}^{-1}$) en maíz y soja, para las diferentes estrategias de riego. En el caso de maíz, la estrategia de RDC PC+LLG, fue la que logró la EUA mayor del ensayo, está no se diferenció de la estrategia de RT, por lo cual, el ahorro de agua no significó un mayor rendimiento, al igual que el resto de las estrategias evaluadas. Trout y DeJonge (2017), reportaron valores similares de grano por unidad de agua consumida en el entorno de 20 a 30 $\text{kg}\cdot\text{mm}^{-1}$. De igual forma, Comas et al. (2019) en estudios realizados en Colorado (EE. UU.) reportaron valores entre 20 y 26 $\text{kg}\cdot\text{mm}^{-1}$, encontrando en este caso mayor EUA con riegos deficitarios, regando hasta el 80% de la ET. En el presente ensayo el rendimiento no aumentó en conjunto a la reducción del agua aplicada, no encontrando un aumento en la EUA de las diferentes estrategias evaluadas en comparación a la estrategia de RT. Sin embargo, cabe destacar las diferencias obtenidas entre el RDC PC+LLG con respecto a RDC V+PC y RDC PC en maíz, observando la importancia de la etapa fenológica donde se aplicó el riego. El riego durante el LLG se tradujo en una mayor EUA en comparación al riego aplicado en la etapa V.

Cuadro 20. Eficiencia del uso del agua (EUA) según las diferentes estrategias de riego evaluadas en maíz y soja. Riego total (RT), riego deficitario controlado en periodo crítico (RDC PC), riego deficitario controlado en etapa vegetativa y periodo crítico (RDC V+PC), riego deficitario controlado en periodo crítico y llenado de granos (RDC PC+LLG) en maíz, riego deficitario controlado en floración y periodo crítico (RDC FL+PC) en soja, riego deficitario 50% del riego total (RD).

Estrategias de riego en maíz	EUA en maíz (kg.mm ⁻¹)	Estrategias de riego en soja	EUA en soja (kg.mm ⁻¹)
RT	27,9 ab	RT	13,0
RDC PC	25,0 b	RDC PC	14,8
RDC V+PC	25,3 b	RDC V+PC	13,1
RDC PC+LLG	29,7 a	RDC FL+PC	13,7
RD	27,7 ab	RD	12,8

Valores con igual letra no difieren entre sí (p<0,05; Tukey)

En soja al igual que en maíz, no se constató una EUA mayor de las estrategias con riego sub-óptimo (RD y RDC) en comparación con el RT, como se observa en el Cuadro 20. Sin embargo, sí se encontró una tendencia a una mayor EUA de la estrategia RDC PC con respecto a las demás evaluadas, exceptuando el RDC FL+PC y RT. Irmak et al. (2014) reportaron resultados diferentes obteniendo valores de 10 kg.mm⁻¹ en tratamientos con aplicaciones de riego a partir de R3, diferenciándose del RT siendo de 5 kg.mm⁻¹, en temporadas con excesivas PP.

Se destacó la estrategia RDC V+PC que a pesar de no diferenciarse en EUA con respecto a RT, obtuvo los máximos rendimientos alcanzados con un ahorro de 103 mm de riego. Por lo que regar únicamente durante las etapas V y PC, suprimiendo el riego durante FL permitió lograr rendimientos similares a RT con menores volúmenes de riego. La relación entre el rendimiento obtenido y los milímetros aplicados de riego fue de 33,5 kg.mm⁻¹ para RDC V+PC, mientras que el RT fue de 23,8 kg.mm⁻¹ (resultados no presentados), por lo que se logró una eficiencia 29% mayor en el RDC V+PC.

La estrategia de RD alcanzó los máximos rendimientos con un ahorro de 150 mm de agua de riego, en cambio, en esta estrategia evaluada durante el 85% de su ciclo obtuvo el porcentaje de AD por encima de los umbrales de riego, producto de las PP ocurridas en la temporada. Por lo cual, es una estrategia que probablemente permita aumentar la EUA de riego, no obstante, no es posible lograr conclusiones definitivas debido a que como se mencionó la estrategia depende de las PP y es posible que varíen los resultados en situaciones con PP menores.

4. CONCLUSIONES

En soja se comprobó que las estrategias de riego sub-óptimo evaluadas lograron rendimientos iguales al RT en todo el ciclo, las mismas fueron el RDC V+PC y el RD. Es importante destacar que la productividad lograda en la estrategia RD es dependiente de las PP de cada temporada, ya que aportar solo el 50% de la lámina de riego requerida para cubrir al ET total puede provocar deficiencias hídricas en etapas de elevada susceptibilidad a la disponibilidad hídrica. En este caso, la temporada presentó PP abundantes y el comportamiento productivo del RD en soja permitió productividades similares a un régimen sin deficiencias hídricas en gran parte del ciclo. No obstante, se debe evaluar esta estrategia en condiciones de deficiencias hídricas más severas, principalmente en las etapas V y PC. El comportamiento productivo logrado con las estrategias de riego sub-óptimo en soja, se adjudicó a la plasticidad que presenta la especie, en la medida que se encuentre cubierta la disponibilidad hídrica en la etapa V y en el PC. Se desprende de los resultados que la etapa que permitió deficiencias hídricas sin afectar el rendimiento fue en la etapa de FL. Por tanto, en la medida que se pretenda reducir los aportes de riego en soja la etapa del ciclo con menor susceptibilidad a las deficiencias hídricas es la FL. Por otra parte, se constató que las deficiencias intensas durante la etapa V imposibilitan concretar la plasticidad característica de la especie en etapas posteriores del ciclo de desarrollo. Este aporte del experimento no tiene antecedentes registrados en la bibliografía.

En maíz, ninguna de las estrategias de riego sub-óptimo evaluadas logró rendimientos iguales al RT. Sin embargo, presentaron comportamientos productivos interesantes las estrategias de RDC PC+LLG y RD. La respuesta encontrada al comportamiento productivo evaluado en maíz se debió a la falta de plasticidad reproductiva que presenta la especie, la misma no tiene grandes posibilidades de compensar los efectos de las deficiencias hídricas en etapas posteriores del ciclo básicamente debido a su crecimiento determinado. La plasticidad vegetativa en

maíz es también baja, no obstante, se constataron las menores disminuciones del rendimiento por deficiencias en la etapa V, se interpretó que este comportamiento se debió a que los fotoasimilados acumulados incluso con deficiencias hídricas en la etapa V permitieron desarrollar adecuadamente las etapas reproductivas sin afectar el rendimiento en forma determinante. Por tanto, en la medida que se pretenda reducir los aportes de riego durante el ciclo en maíz, la etapa V fue la que presentó menor susceptibilidad a las deficiencias hídricas. En relación a la estrategia de RD, el resultado presenta las mismas limitantes analizadas en soja, es decir es una estrategia dependiente de las PP de cada temporada, por tanto, exige repetir en condiciones diferentes de PP.

El maíz y la soja, presentan características fisiológicas diferentes y comportamientos productivos distintos en relación a la disponibilidad hídrica, por tanto, se entiende que la respuesta productiva encontrada ante riegos sub-óptimos coincide con las variables eco-fisiológicas principales de las especies estudiadas.

En maíz como en soja, a pesar de constatar diferencias en crecimiento radicular, en extracción de agua del suelo y en la disponibilidad hídrica según estrategia de riego evaluada, presentaron las mayores estimaciones de pérdidas de agua a causa de escurrimientos superficiales y percolación profunda, en ambos cultivos, producto principalmente del volumen e intensidad de las PP de la temporada.

La EUA no se mejoró por utilizar estrategias de riego sub-óptimo en ambos cultivos, ya que las diferentes disponibilidades hídricas afectaron con similar magnitud los rendimientos. No obstante, en maíz se destacó una mayor EUA en la estrategia de RDC LLG+PC en comparación a RDC V+PC, ya que las deficiencias hídricas durante la etapa V no perjudicaron en mayor magnitud el rendimiento. Así mismo, se interpretó que en soja existió una mayor EUA de riego por parte de la

estrategia RDC V+PC, siendo una alternativa válida para una mejor utilización del riego.

5. BIBLIOGRAFÍA

Agorio C, Cardellino G, Corsi W, Franco J. 1988. Estimaciones de las necesidades de riego en Uruguay. 110 p.

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 2006. Evapotranspiración del cultivo; guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, FAO. 304 p. (Estudio FAO Riego y Drenaje no. 56).

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO. (Irrigations and Drainage; 56). 300 p.

Altamirano A, Da Silva H, Durán A, Echevarría A, Panario D, Puentes R. 1976. Carta de reconocimiento del Uruguay; clasificación de suelos del Uruguay. Montevideo, MAP. DSF. t. 1, 96 p.

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

Andrade FH, Aguirrezabal LAN, Rizzalli RH. 2000. Crecimiento y rendimiento comparados. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, Editorial Médica Panamericana. p. 61-96.

Andrade FH, Sadras VO. 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, Argentina, Editorial Médica Panamericana. pp. 173-206.

Andrade FH, Ferreiro MA. 1996. Reproductive growth of maize, sunflower and soybean at different source levels during grain filling. *Field Crops Res.* 48:155-165.

Andrade FH, Cirilo A, Uhart S, Otegui ME. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. Balcarce: La Barrosa, INTA Balcarce, FCA UNMP, Dekalbpress. 292p.

Andrade FH. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Research*, 41:1-12.

Andrade FH, Gardiol J. 1995. Sequía y producción de los cultivos de maíz, girasol y soja. INTA Balcarce. Boletín Técnico no. 132. 23 p.

Andriani JM. 2002. Estrés hídrico en soja. *IDIA XXI*. 2 (3): 48-51.

Andriani JM. 2000. Consumo de agua de los cultivos en el Sur de Santa Fe. *Para Mejorar la Producción*, 13: 27 - 30.

Andriani JM, Andrade FH, Suero EE, Dardanelli JL. 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans: I. Their effects on dry matter accumulation, and its components. *Agronomie*, 11: 737- 746.

Andrioli KG, Sentelhas PC. 2009. Brazilian maize genotypes sensitivity to water deficit estimated through a simple crop yield model. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44: 653 660.

Aydinsakir K, Erdal S, Buyuktas D, Bastug R, Toker R. 2013. The influence of regular deficit irrigation applications on water use, yield, and quality components of two corn (*Zea mays L.*) genotypes. *Agricultural Water Management*, 128: 65 – 71.

Azcón-Bieto J, Talón M. 2008. Fundamentos de la fisiología vegetal. 2a. ed. Madrid, ES, Mc Graw Hill Interamericana. 651 p.

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

Baigorri H, Ciampitti I, García F. 2009. Como Crece y se desarrolla el cultivo de soja. In. Manual de manejo del cultivo de soja. García, F.; Ciampitti, I.; Baigorri, H. International Plant nutrition Institute. p. 7-16.

Benavides A. 2005. Fotosíntesis; diferencias en las vías metabólicas C3, C4 y CAM. (en línea). s.n.t. s.p. Consultado 15 abr. 2018. Disponible en <http://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Fotosintesis%20C3,C4%20y%20CAM.pdf>

Bidegain SA. 2012. Cuantificación de la respuesta en rendimiento en grano en el cultivo de soja en función de la capacidad de almacenaje de agua del suelo, contenido de agua inicial y distribución de precipitaciones durante el ciclo del cultivo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 34 p.

Birch CJ, Hammer GL, Rickert KG. 1999. Dry matter accumulation and distribution in five cultivars of maize (*Zea mays*): relationships and procedures for use in crop modeling. Australian Journal of Agricultural Research, 50 (4): 513-527.

Borrás L, Westgate ME, Astini JP, Echarte L. 2007. Coupling time to silking with plant growth rate in maize. Field Crops Research, 102: 83-85.

Boyer JS. 1982. Plant productivity and environment. Science, 218: 443 - 448.

Bui MH. 2017. A review of growth stage deficit irrigation effecting sticky maize production. GeoScience Engineering, 13 (2): 13-18. doi: 10.1515/gse-2017-0007.

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

Callero WH. 2014. Maíz, efecto de las deficiencias hídricas sobre el rendimiento. Tesis. Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 51 p.

Cantagallo J, Chimenti C, Hall A. 1997. Number of seeds per unit area in sunflower correlates well with a photothermal quotient. *Crop Sci.* 37:1780-1786.

Capurro MC, Beretta A, García C, Sawchik J, Puppo L. 2017. Rendimiento de la soja en respuesta a distintas dosis y momentos de riego. *Agrociencia (Montevideo)*, 21 (2): 65-76.

Capurro MC. 2016. Respuesta del cultivo de soja a distintas dosis y momentos de riego. Maestría Ciencias Vegetales, Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 151 p.

Carballo de Silva L. 1990. Manejo del riego en soja sembrada en suelos arenosos de la mesa de guanipa. *Agronomía Tropical (Venezuela)*, 40: 35-56.

Cárcova J, Borrás L, Otegui ME. 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en maíz. En: Satorre EH, Banech RL, Slafer GA, de la Fuente EB, Miralles DJ, Otegui ME, Savin R. [Eds.]. *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires Argentina. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires (U.B.A). 133 - 163.

Cardellino G, Baethgen WE. 2000. Análisis de la viabilidad de sistemas de riego para maíz; estudio de casos y evaluación de estrategias. In: *Jornada de Cultivos de Verano (2000, Colonia, Uruguay)*. Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. p. 47-55.

Carter G, Petrella P. 2013. Estudio de distintas poblaciones y dosis de nitrógeno en maíz bajo riego. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 56 p.

Castaño J, Giménez A, Ceroni M, Furest J, Aunchayna R. 2011. Caracterización Agroclimática del Uruguay – 1980-2009. Serie Técnica INIA, V. 193, 34p.

Ceriani M, Innella JA. 2012. Efecto de la fertilización nitrogenada tardía (V10-11) sobre el rendimiento de maíz en condiciones de riego y seco. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 59 p.

Comas LH, Trout TJ, DeJonge KC, Zhang H, Gleason SM. 2019. Water productivity under strategic growth stage-based deficit irrigation in maize. *Agricultural Water Management*, 212: 433-440. doi: 10.1016/j.agwat.2018.07.015.

Cooper RL. 2003. A delayed flowering barrier to higher soybean yields. *Field Crops Research*, 82: 27 -35.

Currié H, Iván E, Caseres SL. 2006. Análisis de la oferta de agua y el uso consuntivo para los cultivos de soja y girasol en el área de influencia de La Tigra, Chaco. (en línea). Corrientes, Universidad Nacional del Nordeste. Facultad de Ciencias Agrarias. 4 p. Consultado 27 set. 2017. Disponible en <http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt2006/05-Agrarias/2006-A-008.pdf>

Dardanelli J, Severina, I, Andriani J. 2010. Funcionalidad de raíces y agua del subsuelo; su rol en la optimización del riego suplementario. In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. 29-37.

Dardanelli J, Collino D, Otegui ME, Sadras VO. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. In: Satorre, E. H.; Benech Arnold, R. L.; Slafer, G. A.; de la Fuente, E. B.; Miralles, D. J.; Otegui, M. E.; Savin, R. eds. *Producción de granos; bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires, Argentina, Facultad de Agronomía. 325-386.

Dardanelli JL, Suero SS, Andrade FH, Andriani JM. 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans. II. Water use and water deficiency indicators. *Agronomie*, 11: 747-756.

Della Maggiora AI, Gardiol JM, Irigoyen AI. 2000. Requerimientos hídricos. In: Andrade FH, Sadras VO. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, EEA INTA Balcarce/ UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. p. 155-171.

Desclaux D, Huynh T, Roumet P. 2000. Identification of soybean plant characteristics that indicate the timing of drought stress. *Crop Science*, Madison, 40: 716-722.

Djaman K, Irmak S. 2012. Soil water extraction patterns and crop, irrigation, and evapotranspiration water use efficiency of maize under full and limited irrigation and rainfed settings. *Biological Systems Engineering*, 55(4): 1223-1238. ISSN 2151-0032.

Doorenbos J, Kassam A. 1990. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Roma: FAO. Estudio de Riego y Drenaje N° 33. 211 p.

Durán A, Califra A, Molfino JH. 1999. Suelos del Uruguay según soil taxonomy. (en línea). Montevideo, MGAP. 14 p. Consultado 25 nov. 2018. Disponible en <http://web.renare.gub.uy/media/suelos/informes/SuelosUruguaySoilTaxonomyInforme.PDF>

Egli DB, Meckel L, Phillips RE, Radcliffe D, Leggett JE. 1983. Moisture stress and N redistribution in soybean. *Agronomy Journal*, 75: 1027 - 1031.

El-Hendawy SE, El-Lattief EAA, Ahmed MS, Schmidhalter U. 2008. Irrigation rate and plant density effects on yield and water use efficiency of drip-irrigated corn. *Agricultural Water Management*, 95 (7): 836-844. doi: 10.1016/j.agwat.2008.02.008.

English MJ, Solomon KH, Hoffman GJ. 2002. A paradigm shift in irrigation management. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 128: 267–277.

English MJ. 1990. Deficit Irrigation. I: Analytical Framework. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 116: 399-412.

Ertek A, Kara B. 2013. Yield and quality of sweet corn under deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 129: 198-144.

Fabeiro C, López R. 2005. Riego deficitario controlado. In: Martín de Santa Oalla F. (ed). *Agua y Agronomía. Mundi –Prensa, Madrid, España*. p. 407-432.

FAO. 2017. El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2017. Aprovechar los sistemas alimenticios para lograr una transformación rural inclusiva. Roma. 201 p. Consultado 14 de set. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/3/i7658s/i7658s.pdf>

Farias JR, Nepomuceno AL, Neumaier N. 2007. Ecofisiología da soja. *Circular Técnica. Embrapa*, 48: 1-9.

Farré I, Faci JM. 2009. Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a mediterranean environment. *Agricultural Water Management*, 96: 383 – 394. doi: 10.1016/j.agwat.2008.07.002.

Fassio A, Carriquiry AI, Tojo C, Romero R. 1998. Maíz; aspectos sobre fenología. Montevideo, INIA. pp. 1-50 (Serie Técnica no. 101).

Fehr WR, Caviness CE. 1977. Stages of soybean development. Iowa State University. Cooperative Extension Service. Special report no. 80. p. 929-931.

Fereres E, Soriano M A. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58 (2):147–159. doi: 10.1093/jxb/erl165.

Flannery R. 1983. Soybean Research Yields top 118 bu/A. *Bettors Crops with Plant Food*, 68: 6 - 7.

Gadédjisso-Tossou A, Avellán T, Schütze N. 2018. Potential of Deficit and Supplemental Irrigation under Climate Variability in Northern Togo, West Africa. *Agricultural Water Management*, 10: 1-23. doi: 10.3390/w10121803.

García H, Ferrarotto M. 2009. Efecto del déficit hídrico sobre la acumulación de biomasa y nitrógeno en soja (*Glicine Max*) inoculada con *Bradirhizobium japonicum*. (en línea). Aragua, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. pp. 21-27. Consultado 18 set. 2017. Disponible en: http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_agro/article/view/130/108

García Petillo M, Puppo L, Hayashi R, Morales P, Bentancor L. 2013. Curso de riego y drenaje. Montevideo. Facultad de Agronomía. 266 p.

García Petillo M, Puppo L, Hayashi R, Morales P. 2012. Metodología para determinar los parámetros hídricos de un suelo a campo. Consultado 20 set. 2019. Disponible en: <http://www.grupodesarrolloriego.uy/pdf/2-seminario-2012/Metodologia-para-determinar-los-parametros-hidricos-de-un-suelo-a-campo.pdf>

Gerster G, Bacigaluppo S. 2009. Cómo alcanzar altos rendimientos en soja. INTA. *Para Mejorar la Producción*. no. 42: 63-67.

Giménez LA. 2017. Deficiencias hídricas en distintas etapas fenológicas de maíz y soja y evaluación del modelo aquacrop. Tesis de Doctorado Ing. Agr. Paysandú, Uruguay. Facultad de Agronomía. 244 p.

Giménez LA, Paredes P, Pereira LS. 2017. Water Use and Yield of Soybean under Various Irrigation Regimes and Severe Water Stress. Application of AquaCrop and SIMDualKc Models. *Agricultural Water Management*, 9 (6): 1-18. doi: 10.3390/w9060393.

Giménez LA. 2014. Efecto de las deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo sobre el rendimiento de soja. *Agrociencia* (Montevideo), 18 (1): 53-64.

Giménez LA. 2012. Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (2°, 2012 Paysandú, Uruguay) p. 33-41.

Giménez LA, García M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia*, 15: 100-108.

Giménez LA, Böcking B, García Petillo M, García C, Sawchik J. 2010. Prologo; marco de referencia del seminario, en "1° Seminario Internacional Riego en Cultivos y Pasturas" p. 3-4. (Paysandú, Uruguay, Facultad de Agronomía).

Giménez LA. 2000. Efecto del riego sobre el rendimiento y calidad de algodón y maíz. In: Seminario de Investigación Aplicada PRENADER. (3°, 2000 Montevideo, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA Las Brujas. s.p.

Grant FM, Jackosn BS, Kiniry JR, Arkin GF. 1989. Water deficit timing effects on yield components in maize. *Agronomy journal*, 81: 61-65.

Grasso JP, Montero JA. 2011. Efecto de diferentes disponibilidades hídricas sobre el rendimiento de soja. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 56 p.

Hayashi S, Dogliotti R. 2021. Water productivity in maize, at different levels of deficit irrigation in humid climate. *Agrociencia*, 25 (1), 15p. DOI: 10.31285/AGRO.25.390.

Henry J. 1973. Evapotranspiration studies. Uruguay. Unesco. N° 2936, 66p.

Hui R, Shaozhong K, Fusheng L, Ling T, Risheng D, Taisheng D, Sien L, Xiaotao Z. 2017. Performance of AquaCrop and SIMDualKc models in evapotranspiration partitioning on full and deficit irrigated maize for seed production under plastic film-mulch in an arid region of China. *Agricultural Systems*, 151: 20-32. doi: 10.1016/j.agsy.2016.11.001.

Irmak S, Specht JE, Odhiambo LO, Rees JM, Cassman KG. 2014. Soybean Yield, Evapotranspiration, Water Productivity, And Soil Water Extraction Response To Subsurface Drip Irrigation And Fertigation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 57(3): 729-748. doi: 10.13031/trans.57.10085.

Kang S, Shi W, Zhang J. 2000. An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation. *Field Crops Research*, 67(3): 207-214.

Kantolic A, Satorre E. 2004. Elementos centrales de ecofisiología del cultivo de soja. Manual práctico para la producción de soja. Buenos Aires, Argentina, Hemisferio sur, 19-37.

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

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

Karam RM, Sfeir F, Mounzer O, Roupael Y. 2005. Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. *Agricultural Water Management*, 75: 226-244.

Kirda C. 2002. Deficit irrigation scheduling based on plant growth stages showing water stress tolerance. In: *FAO. Deficit irrigation practices*. Rome, FAO. 3-10.

Ko J, Piccini G. 2009. Corn yield responses under crop evapotranspiration-based irrigation management. *Agricultural Water Management*, 96 (5): 799 – 808. doi: 10.1016/j.agwat.2008.10.010.

Koech R, Langat L. 2018. Improving Irrigation Water Use Efficiency: A Review of Advances, Challenges and Opportunities in the Australian Context. *Agricultural Water Management*, 10: 1-17. doi: 10.3390/w10121771.

Kuscu H, Karasu A, Oz M, Demir AO, Turgut I. 2013. Effect of irrigation amounts applied with drip irrigation on maize evapotranspiration, yield, water use efficiency, and net return in a sub-humid climate. *Turkish Journal of Field Crops*, 18 (1): 13-19. doi: 10.17557/TJFC.54592.

Lamm FR, Rogers DH, Manges HL. 1994. Irrigation scheduling with planned soil water depletion. *Transactions of the ASAE*, 37(5): 1491-1497.

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

Maddoni GA, Otegui ME, Bonhomme R. 1998. Grain yield components in maize: II. Postsilking growth and kernel weight. *Field Crops Research*. 56(3): 257-264.

Magalhães A, Da Silva WJ. 1987. *Determinantes genéticos-fisiológicos da produtividade do milho: melhoramiento y produção do milho*. San Pablo. Fundação Cargill. 425 p.

Martin DL, Dorn TW, Melvin SR, Corr AJ, Kranz WL. 2011. Evaluating energy use for pumping irrigation water (en línea). *Proceedings of the 23rd Annual Central Plains Irrigation Conference*, Burlington, CO. 22–23 February 2011. CPIA, Colby, Kansas. 104-116. Consultado 5 mar. 2018. Disponible en: <https://www.ksre.k-state.edu/irrigate/oow/p11/Kranz11a.pdf>

Mbava N, Mutemab M, Zengenia R, Shimelisa H, Chaplot V. 2020. Factors affecting crop water use efficiency: A worldwide meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 228: 1-11. doi: 10.1016/j.agwat.2019.105878.

Medrano H, Bota J, Cifre J, Flexas J, Ribas-Carbó M, Gulías J. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. (en línea). Investigaciones Geográficas, 43: 63-84. Consultado 5 mar. 2018. Disponible en http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/10196/1/IG_43_04.pdf

MGAP-DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2020. Encuesta Agrícola “Invierno 2020”. Consultado el día 25 may. 2021. Disponible en: https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-08/PUBLICACION_INV2020.pdf

MGAP-DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2017. Resultados del monitoreo de producción de Soja 2017. Consultado el día 24 jul. 2017. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/unidad-ejecutora/oficina-de-programacion-y-politicas-agropecuarias/diea-presenta-los-resultados-del-monitoreo-de-produccion-de-soja-2017>

MGAP-DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca-Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2016. (En línea) Consultado el día 24 de jul. 2017. Disponible en: http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/encuesta_agricola_invierno_2016.pdf

MGAP-DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca-Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2015. (En línea) Consultado el día 24 de jul. 2017. Disponible en: <http://www2.mgap.gub.uy/DieaAnterior/Anuario2015/DIEA-Anuario2015-01web.pdf>

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

Monzon JP, Cafaro N, Cerrudo A, Canepa M, Rattalino Edreira JI, Specht J, Andrade FH, Grassini P. 2021. Critical period for seed number determination in soybean as determined by crop growth rate, duration, and dry matter accumulation. *Field Crops Research*, 261: 1-9. doi: 10.1016/j.fcr.2020.108016.

Musick JT, New LL, Dusek DA. 1976. Soil water depletion- Relationships of irrigated sorghum, wheat, and soybeans. *Transactions of the ASAE*, 19 (3): 489-493.

NeSmith DS, Ritchie JT. 1992. Maize (*Zea mays* L.) response to a severe soilwater-deficit during grain-filling. *Field Crops Research*, 29 (1): 23-35.

Neyshabouri MR, Hatfield JL. 1986. Soil water deficit effects on semideterminate and indeterminate soybean growth and yield. *Field Crops Research*, 15(1): 73-84.

Orduña ME, Schütze N, Niyogi D. 2019. Evaluation of Hydroclimatic Variability and Prospective Irrigation Strategies in the U.S. Corn Belt. *Agricultural Water Management*, 11 (12): 1-18. doi: 10.3390/w11122447.

Otegui, ME. 2009. Bases ecofisiológicas para el manejo del agua en cultivos para grano conducidos en seco. *Manejo del agua en cultivos para grano conducidos en seco. Informaciones Agronómicas*. no. 44: 16-20.

Otegui ME, Bonhomme R. 1998. Grain yield components in maize I. Ear growth and kernel set. *Field Crops Research*. 56(3): 247-256.

Otegui ME, Andrade FH, Suero EE. 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Research*, 40(2): 87-94.

Paço TA, Pôças I, Cunha M, Silvestre JC, Santos FL, Paredes P, Pereira LS. 2014. Evapotranspiration and crop coefficients for a super intensive olive orchard. An application of SIMDualKc and METRIC models using ground and satellite

observations. *Journal of Hydrology*, 519: 2067-2080. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.075.

Paliwal RL, Granados G, Lafitte HL, Violic AD. 2009. El maíz en los trópicos; mejoramiento y producción. (en línea). Roma, Italia, FAO. s.p. Consultado 21 dic. 2018. Disponible en: http://www.fao.org/docrep/003/x7650s/x7650s02.htm#P0_0

Payero JO, Tarkalson DD, Irmak S, Davidson D, Petersen JL. 2009. Effect of timing of a deficit-irrigation allocation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency and dry mass. *Agricultural Water Management*, 96: 1387-1397. doi: 10.1016/j.agwat.2009.03.022.

Pereira LS, Paredes P, Rodrigues GC, Neves M. 2015. Modeling malt barley water use and evapotranspiration partitioning in two contrasting rainfall years. Assessing AquaCrop and SIMDualKc models. *Agricultural Water Management*, 159: 239–254. doi: 10.1016/j.agwat.2015.06.006.

Pereira LS, Alves I. 2005. Crop water requirements. In: Hillel, D. ed. *Encyclopedia of soils in the environment*. London, Elsevier. 322 - 334.

Prieto Angueira S, Prieto Garra DR, Angella GA. 2013. Evaluación de diferentes estrategias de riego deficitario controlado en el cultivo de soja [*Glycine max* (L.) Merrill]. Conagua. Santiago del Estero, Argentina, EEA INTA Santiago del Estero/ UNSE. Facultad de Agronomía y Agroindustrias. 10 p.

Rameau D, Van Den Dorpel M. 2016. Respuesta del maíz a la población y a dos dosis de nitrógeno en condiciones de riego. Tesis Ing. Agr. Paysandú, Uruguay. Facultad de Agronomía. 78 p.

Ritchie SW, Hanway JJ. 1982. How a corn plant develops. Ames, Iowa, Iowa State University. Special Report no. 48, 16 p.

Rivetti AR. 2006. Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto, Córdoba, Argentina. Revista Facultad de Ciencias Agrarias (UN Cuyo), 38: 25-36.

Rodríguez H, Dardanelli J, De Battista J, Castellá M, Chaix X, Rochás M, Burgos G. 2012. Evaluación de respuesta en rendimiento al riego suplementario en soja sobre un suelo Vertisol. Entre Ríos, INTA EEA Concepción del Uruguay. 1-5.

Rosadi RA, Afandi S, Senge M, Ito K. 2005. Critical water content and water stress coefficient of soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) under deficit irrigation. Paddy Water Environment, 3: 219-223.

Sadras VO, Ferreiro M, Gutheim F, Kantolic A. 2000. Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperiodo. In: Andrade FH, Sadras VO. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, EEA INTA Balcarce/ UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. 29-60.

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

Santos DJ. 2009. Tolerancia al déficit hídrico, fijación biológica de nitrógeno y algunos mecanismos que los relacionan en soja. Paraná, INTA. Estación Experimental Agropecuaria Paraná. 7 p.

Sawchik J, Mas C, Pérez Gomar E, Bermúdez R, Pravia V, Giorello D, Ayala W. 2010. Riego suplementario en pasturas; antecedentes de investigación nacional. In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (1º., 2010 Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. 141-153.

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

Shaw RH. 1988. Climate requirement. In: Sprague G F, Dudley, J. W. eds. Corn and corn improvement. 3rd. ed. Madison WI, American Society of Agronomy, 18: 609-638.

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

Sincik M, Candogan B, Demirtas C, Buyukcangaz H, Yazgan S, Goksoy A. 2008. Deficit irrigation of soybean [*Glicine Max (L) Merr.*] in a sub-humid climate. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 194: 200-205.

Smidt SJ, Haacker EMK, Kendall AD, Deines JM, Pei L, Cotterman KA, Li H, Liu X, Basso B, Hyndman DW. 2016. Complex water management in modern agriculture: Trends in the water–energy–food nexus over the High Plains aquifer. *Science Total Environment*, 566: 988–1001. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.127.

Steduto P, Hsiao T, Fereres E, Raes D. 2012. Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Estudio FAO Riego y Drenaje 66. Roma Italia. 510 p.

Torrion J, Setiyono T, Graef G, Cassman K, Irmak S, Specht J. 2014. Soybean Irrigation Management: Agronomic impacts of deferred, deficit and full-season strategies. *Crop Science*, 54: 2782-2795. doi: 10.2135/cropsci2014.03.0261.

Trout TJ, DeJonge KC. 2017. Water productivity of maize in the US high plains. *Irrig Sci.*, 10: 1-19. doi: 10.1007/s00271-017-0540-1.

Trout TJ, Bausch W, Buchleiter G. 2010. Does deficit irrigation give more crop per drop? In: The annual central plains irrigation conference (22nd., 2010, Kearney, Nebraska). Proceedings. Kansas, Colby. 36-40.

Valentinuz OR. 1996. Crecimiento y rendimiento comparados de girasol, maíz y soja ante cambios en la densidad de plantas. M.Sc. Thesis. UNMDP, Balcarce.

Vallone P, Gudelj V, Glarza C, Masiero B, Ferreira L, Canale A. 2011. Ensayo de densidad y distancia de siembra de maíz. INTA. Maíz, Informe de Actualización Técnica. no. 19: 11-13.

Vega CR, Andrade FH, Sadras VO, Uhart SA, Valentinuz OR. 2001. Seed number as a function of growth. A comparative study in soybean, sunflower, and maize. *Crop Science*, 41(3): 748-754.

Vernetti F. 2002. Competição de cultivares de soja sob dois sistemas de irrigação em planossolo. Embrapa Clima Temperado. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento no. 2: 1-15.

Wada Y, Bierkens MFP. 2014. Sustainability of global water use: Past reconstruction and future projections. *Environ*, 9: 1-17. doi: 10.1088/1748-9326/9/10/104003.

Wani S, Heng L, Vajja N. 2012. Soybean. In. *Crop Yield response to water*. FAO Irrigation and drainage paper, 66: 124-131.

Westgate ME, Boyer JS. 1985. Carbohydrate reserves and reproductive development at low leaf water potentials in maize. *Crop Science*, 25: 762-769.

Zampedri SM, Currie HM. 2000. Impacto del riego complementario en los rendimientos del cultivo de la soja en el centro sur de la Provincia de Corrientes. In: *Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas (7ª, 2000, Corrientes, AR)*. Trabajos presentados. Corrientes, AR, Universidad Nacional del Nordeste. Facultad de Ciencias Agrarias. Cátedra Hidrología Agrícola. 1-3.

Zhang H, Han M, Comas LH, DeJonge KC, Gleason SM, Trout TJ, Ma L. 2019. Response of Maize Yield Components to Growth Stage-Based Deficit Irrigation.

Climatology and water management. *Agronomy Journal*, 111 (6): 1-9. doi: 10.2134/agronj2019.03.0214.

Zwart SJ, Bastiaanssen WGM. 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural Water Management*, 69: 115–133. doi: 10.1016/j.agwat.2004.04.007.