

El Agua en diferentes estrategias productivas de soja (*Glycine max (L.)  
Merr.*): disponibilidad inicial, consumo y eficiencia de uso

*Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires,  
Área Producción Vegetal*

**Rocío Anahí Filippi**

Ingeniera Agrónoma - Universidad Nacional del Litoral- 2012

Lugar de trabajo: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano  
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

Fecha de entrega: 14 de junio de 2019

COMITÉ CONSEJERO

**Dra. Ing. Agr. Adriana G. Kantolic**

Facultad Agronomía de la Universidad de Buenos Aires (FAUBA)

Directora de tesis

**Ing. Agr. MSc. Diego J. Santos**

Instituto Nacional Tecnología Agropecuaria (INTA), EEA Paraná

Co-director de tesis

**Dedicatoria**

*A mi Amparo*

## **Agradecimientos**

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia por apoyarme siempre, por acompañarme muchas veces en mis viajes a Buenos Aires, por ayudarme con mi bebé cuantas veces lo necesité. También a mi pareja, nada más y nada menos que, por estar y tolerarme a lo largo de este camino.

Un agradecimiento especial para mis consejeros de tesis, Adriana y Diego, que no sólo me transmitieron la experiencia, el conocimiento y su tiempo, sino que también me dieron aliento cuando lo necesité y me transmitieron entusiasmo.

Un reconocimiento al INTA por haberme dado el espacio, el tiempo y los medios necesarios para poder realizar esta especialización y la oportunidad de desarrollarme profesionalmente. A mis compañeros, auxiliares de campo, por haberme colaborado en los ensayos.

Por último, no quiero dejar de mencionar a Beto Micheloud, que me ayudó con sus aportes para el cuarto capítulo de este documento y a Hugo Peltzer, que fue quien me sugirió la temática abordada.

*Declaro que el materia incluido en la tesis es, a mi mejor saber y entender original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida que me identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.*

A handwritten signature in black ink, consisting of several vertical strokes and a horizontal line at the bottom.

## INDICE GENERAL

<b>RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Antecedentes .....</b>	<b>4</b>
1.1.1 La soja en Argentina y Entre Ríos .....	4
1.1.2 La captación de recursos en los sistemas de únicos cultivos anuales vs. los doble cultivos .....	6
1.1.2.1 La soja en los sistemas doble cultivo. Impacto de la fecha de siembra y el agua disponible .....	7
1.1.2.2 Los grupos de madurez en soja, su relación con el agua disponible a la siembra y el consumo durante el ciclo.....	8
<b>1.2 Objetivos .....</b>	<b>9</b>
1.2.1 Objetivo general.....	9
1.2.2 Objetivos específicos .....	9
<b>1.3 Hipótesis .....</b>	<b>10</b>
<b>1.4 Organización de la Tesis.....</b>	<b>11</b>
<b>CAPITULO 2: CONSUMO DE AGUA EN SOJA DE DIFERENTES LONGITUDES DE CICLOS, SEGÚN ANTECESOR.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Introducción .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Materiales y métodos .....</b>	<b>14</b>
2.2.1 Tratamientos y diseño experimental del ensayo.....	14
2.2.2 Registro de datos y cálculo de variables .....	15
2.2.2.1 Datos meteorológicos .....	15
2.2.2.2 Fenología .....	16
2.2.2.3 Humedad de suelo.....	16
2.2.2.4 Agua disponible .....	16
2.2.2.5 Consumo de agua.....	17
2.2.3 Análisis estadístico.....	17
<b>2.3 Resultados .....</b>	<b>18</b>
2.3.1 Caracterización meteorológica .....	18
2.3.2 Fenología .....	19

2.3.3 Condiciones hídricas de perfil de suelo.....	20
2.3.3.1 Condiciones hídricas previas y a la siembra de soja .....	20
2.3.3.2 Condiciones hídricas durante el crecimiento de la soja .....	22
2.3.4 Consumo de agua en soja .....	27
2.3.4.1 Consumo total acumulado .....	27
2.3.4.2 Consumo acumulado en el tiempo .....	27
<b>2.4 Discusión .....</b>	<b>30</b>
<b>CAPITULO 3: CRECIMIENTO, RENDIMIENTO Y EFICIENCIA DE USO DE LOS RECURSOS.....</b>	<b>34</b>
<b>3.1 Introducción .....</b>	<b>35</b>
3.1.1 Determinantes del rendimiento de los cultivos .....	35
3.1.2 Limitaciones hídricas al rendimiento .....	36
3.1.3 Eficiencia en el uso de los recursos según el sistema productivo .....	37
<b>3.2 Materiales y métodos .....</b>	<b>38</b>
3.2.1 Biomasa, rendimiento e índice de cosecha.....	38
3.2.2 Intercepción de la radiación.....	39
3.2.3 Eficiencia en el uso de la radiación (EUR).....	39
3.2.4 Eficiencia en el uso del agua (EUA) .....	39
3.2.5 Aprovechamiento de las precipitaciones .....	39
3.2.6 Análisis estadístico .....	39
<b>3.3 Resultados .....</b>	<b>40</b>
3.3.1 Biomasa, rendimiento e índice de cosecha.....	40
3.3.2 Radiación interceptada .....	44
3.3.3 Eficiencia en el uso de la radiación .....	46
3.3.4 Eficiencia en el uso del agua .....	48
3.3.5 Aprovechamiento de las precipitaciones .....	48
3.3.6 El rendimiento y el agua disponible inicial (ADi) .....	49
<b>3.4 Discusión .....</b>	<b>50</b>
<b>CAPITULO 4: APLICACIÓN DE MODELO CROPGRO PARA EVALUAR LA IMPORTANCIA DEL AGUA DISPONIBLE INICIAL EN SOJA .....</b>	<b>53</b>
<b>4.1 Introducción .....</b>	<b>54</b>
<b>4.2 Materiales y métodos .....</b>	<b>55</b>
<b>4.3 Resultados .....</b>	<b>56</b>
4.3.1 Validación del modelo a partir de valores observados .....	56
4.3.2 Análisis exploratorio de datos para una serie de años.....	59

<b>4.4 Discusión .....</b>	<b>61</b>
<b>CAPITULO 5: CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>64</b>
<b>BILOGRAFIA.....</b>	<b>68</b>
<b>APENDICE .....</b>	<b>75</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

### **CAPITULO 2: CONSUMO DE AGUA EN SOJA DE DIFERENTES LONGITUDES DE CICLOS, SEGÚN ANTECESOR**

Tabla 2.1. Esquema de los tratamientos evaluados según cada campaña. Antecesores a soja: barbecho maíz (BB) y trigo, con condiciones hídricas a la siembra normales (TR) y modificada (TRs). Grupo de madurez de soja (GM), ciclo corto (CC) y ciclo largo (CL).....	15
Tabla 2.2. Datos anuales de precipitación (PP, mm) y evapotranspiración (ETP, mm). .....	18
Tabla 2.3. Fechas fenológicas de los cultivares NA5009 y DM6.8i, para las tres campañas de evaluación .....	20
Tabla 2.4. Agua disponible (AD, mm) a una profundidad de 1,6 m, a la siembra de soja, para las tres campañas en evaluación y sobre tratamientos con barbecho (BB), trigo (TR), trigo + shelter (TRs). .....	22
Tabla 2.5. Valores de p, según diferentes fuentes de variación, para la dinámica del agua total en el perfil a lo largo del crecimiento de la soja. ....	25
Tabla 2.6. Valores de p para las diferentes fuentes de variación de los tratamientos en profundidad de suelo, para el inicio y final de la fase reproductiva de la soja.....	26
Tabla 2.7. Consumo de agua de soja (mm) para tratamientos con antecesor barbecho maíz (BB), trigo (TR), trigo + shelter (TRs), grupo de madurez (GM) de soja ciclo corto (CC) y ciclo largo (CL).....	27

### **CAPITULO 3: CRECIMIENTO, RENDIMIENTO Y EFICIENCIA DE USO DE LOS RECURSOS**

Tabla 3.1. Biomasa del cultivo de soja ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) en estados de R1, R3, R5 y R7 para dos grupos de madurez (GM), sembrados sobre diferentes antecesores, en Paraná, ER. ....	41
Tabla 3.2. Rendimiento ajustado a humedad de 13,5%, Peso de mil granos (P1000, g) y numero de granos ( $\text{N gr m}^{-2}$ ) para dos grupos de madurez de soja (GM), sembrados sobre diferentes antecesores, en Paraná, ER .....	42
Tabla 3.3. Radiación solar incidente ( $R_i$ ) diaria y mensual, $\text{MJ.m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ .....	44
Tabla 3.4. Radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi) desde floración a madurez fisiológica para dos grupos de madurez (GM) de soja, sembrados sobre diferentes antecesores, en Paraná, ER .....	46
Tabla 3.5. Eficiencia de uso de la radiación para biomasa ( $\text{EUR}_b$ ) y rendimiento ( $\text{EUR}_r$ ), expresada en $\text{g Mj}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , para dos grupos de madurez (GM) de soja, sembrados sobre diferentes antecesores, en Paraná, ER. ....	47
Tabla 3.6. Eficiencia en el uso del agua para biomasa ( $\text{EUAb}$ , $\text{kg mm}^{-1}$ ) y rendimiento ( $\text{EUAr}$ , $\text{kg mm}^{-1}$ ), para dos grupos de madurez (GM) de soja, sembrados sobre diferentes antecesores, en Paraná, ER .....	48

## **CAPITULO 4: APLICACIÓN DE MODELO CROPGRO PARA EVALUAR LA IMPORTANCIA DEL AGUA DISPONIBLE INICIAL EN SOJA**

Tabla 4.1. Períodos de tiempo modificados, con precipitaciones anuladas, según cada campaña y grupo de madurez (GM) evaluado (CC: ciclo corto y CL: ciclo largo). .....	56
---	----

## INDICE DE FIGURAS

### CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL

Figura 1.1. Superficie sembrada de soja (miles de hectáreas) en a) Argentina, y en b) Entre Ríos, período 1973-2014. ....5

### CAPITULO 2: CONSUMO DE AGUA EN SOJA DE DIFERENTES LONGITUDES DE CICLOS, SEGÚN ANTECESOR

Figura 2.1. Distribución de la frecuencia acumulada de las precipitaciones para la serie 2000/01-2016/7 y, para a) fin de ciclo trigo-siembra soja y b) ciclo de crecimiento de la soja .....19

Figura 2.2. Agua disponible (AD) a 1,60 m durante el ciclo del trigo, expresado en días desde su siembra (DDS). a) Campaña 2013/4, b) Campaña 2015 y c) Campaña 2016/7.....21

Figura 2.3. a, c), e) Agua Total (AT, mm) en el perfil, a 160 cm, en función de los días desde la siembra de soja (DDS). b), d) y e) Balance hídrico para el ciclo de crecimiento de la soja, precipitación (PP) y evapotranspiración potencial (ETP) en mm 10 días<sup>-1</sup>. ....23

Figura 2.4 Variación del contenido volumétrico de agua (cm cm<sup>-3</sup>) en profundidad para el inicio (R1, a la izquierda) y final de la fase reproductiva de la soja (R7, a la derecha). ....26

Figura 2.5. Consumo acumulado en función de días desde la siembra (DDS) de soja para antecesor barbecho maíz (BB, círculos), trigo (TR, triángulos) y trigo + shelter (TRs, cuadrados). a) Campaña 2013/4, b) Campaña 2014/5, c) Campaña 2016/7. ....28

Figura 2.6. Consumo acumulado para cultivar de soja ciclo corto (símbolos llenos) y ciclo largo (símbolos vacíos), en función de días desde la siembra (DDS). a) Campaña 2013/4, b) Campaña 2014/5, c) Campaña 2016/7. ....29

Figura 2.7. Estimación de la dinámica del consumo del agua inicial a lo largo del ciclo de soja expresado en días desde la siembra, DDS) para a) Campaña 2013/4, b) Campaña 2014/5 y c) Campaña 2016/7.....30

### CAPITULO 3: CRECIMIENTO, RENDIMIENTO Y EFICIENCIA DE USO DE LOS RECURSOS

Figura 3.1. Índice de cosecha (IC) en soja para a) Campaña 2013/4, b) 2014/5 y c) 2016/7, y d) promedio de los tres períodos.... 42

Figura 3.2. Eficiencia de intercepción (ei) expresada en días desde la siembra (DDS).....45

Figura 3.3. Aprovechamiento de las precipitaciones anuales (%) para monocultivo de soja ciclo corto (CC) y ciclo largo (CL), secuencia trigo/soja CC y trigo/soja CL. a) Campaña 2013/4, b) 2014/5 y c) 2016/7. ....47

Figura 3.4. a) Rendimiento relativo de soja en función del agua disponible a la siembra (ADi) y, b) del ADi más las precipitaciones del ciclo (ADi+PP). ....48

## **CAPITULO 4: APLICACIÓN DE MODELO CROPGRO PARA EVALUAR LA IMPORTANCIA DEL AGUA DISPONIBLE INICIAL EN SOJA**

Figura 4.1. a) Fenología observada en <b>a)</b> cultivar NA5009 RG (CC) vs simulada y, <b>b)</b> observada en cultivar DM6.8i (CL) vs simulada con A6445 (CL), en días desde la siembra (DDS). ....	57
Figura 4.2. Comparación de evapotranspiración simulada y observada .....	58
Figura 4.3. Relación entre rendimiento simulado y observado, en $\text{kg ha}^{-1}$ .....	58
Figura 4.4. Rendimiento simulado (promedio 3 campañas) con régimen hídrico normal en PC y con régimen hídrico modificado en PC (sin precipitaciones). ....	59
Figura 4.5.a) Efecto de la disponibilidad de agua disponible a la siembra sobre el rendimiento simulado. b) Variación interanual para 16 escenarios climáticos (2000-16) .....	60
Figura 4.6. Rendimiento ( $\text{Kg ha}^{-1}$ ) observado y simulado en función del agua disponible a la siembra (AD, mm) y las precipitaciones (PP, mm) durante el ciclo. ....	62

## ABREVIATURAS

AD: agua disponible  
 ADi: agua disponible inicial  
 ANOVA: análisis de la varianza  
 AU: agua útil  
 BB: barbecho maíz  
 CapC: capacidad de campo  
 CC: ciclo corto, en referencia a grupo de madurez de soja  
 CdeC: cultivo de cobertura  
 CL: ciclo largo, en referencia a grupo de madurez de soja  
 CO: centro oeste, en referencia a la provincia de Entre Ríos  
 Dap: densidad aparente del suelo  
 DDS: días desde la siembra  
 Ec.: ecuación  
 ETP: evapotranspiración potencial  
 Ei: eficiencia de intercepción  
 EUA: eficiencia en el uso del agua  
 EUA<sub>b</sub>: eficiencia en el uso del agua en términos de biomasa  
 EUA<sub>r</sub>: eficiencia en el uso del agua en términos de rendimiento de grano  
 EUR: eficiencia en el uso de la radiación  
 EUR<sub>b</sub>: eficiencia en el uso de la radiación en términos de biomasa  
 EUR<sub>r</sub>: eficiencia en el uso de la radiación en términos de rendimiento de grano  
 GM: grupo de madurez  
 IC: índice de cosecha  
 Lam: lámina de agua  
 Lam<sub>a</sub>: lámina de agua actual  
 Li: límite inferior  
 MF: madurez fisiológica  
 PC: período crítico  
 PMP: punto de marchitez permanente  
 PP: precipitación  
 PPef: precipitación efectiva  
 Rg: radiación global  
 Ri: radiación interceptada  
 RFAi: Radiación fotosintéticamente activa interceptada  
 TR: antecesor trigo  
 TRs: antecesor trigo+ condición hídrica modificada a la siembra de la soja mediante “shelter”

## RESUMEN

La práctica del doble cultivo permite mejorar el uso de los recursos como agua y radiación. Sin embargo, a menudo, se ve limitada debido a que el cultivo invernal reduce el agua almacenada en el suelo para el cultivo siguiente. En esta tesis se evaluó el impacto del agua disponible inicial (ADi), a la siembra de soja, por efecto del antecesor, sobre su rendimiento y consumo de agua. Se analizaron tres campañas agrícolas con ensayos a campo en la Estación Experimental del INTA Paraná, Entre Ríos, sobre un suelo Árgiudol ácuico. Se consideraron dos secuencias de cultivo, barbecho proveniente de maíz/soja (BB) y trigo/soja (TR); sobre esta última, además, se tuvieron dos condiciones de humedad a la siembra de la soja. En los tres casos se utilizaron dos cultivares de soja de grupos de madurez (GM) distintos: uno representando un ciclo corto (CC, GM V corto) y otro, un ciclo largo (CL, GM VI largo). Se evaluó la dinámica del consumo de agua, y las eficiencias en el uso del agua (EUA) y de la radiación (EUR), para cada combinación antecesor/condición hídrica y cultivar. Para los tres períodos, las diferencias de ADi entre BB (170 mm) y TR (100 mm) determinadas hacia la madurez del trigo se redujeron con el avance del período lluvioso de primavera: a la siembra en las campañas 1 y 2 y, a los 20-30 días posteriores en la tercera. Se determinó un mayor consumo, entre 40-80 mm extras, cuando la soja estuvo sobre BB. Sin embargo, el rendimiento no presentó diferencias significativas entre los tratamientos ( $p > 0,05$ ), en dos de las tres campañas, ni tuvo una relación ajustada con el ADi ( $R^2 = 0,24$ ). Para la EUA y la EUR las diferencias encontradas estuvieron asociadas al cultivar; en períodos de abundante precipitación (PP, +700 mm) como la Campaña 3, la EUA del CL ( $4,8 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1}$ ) fue mayor a la del CC ( $3,8 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1}$ ) mientras que, con lluvias moderadas como en la Campaña 1 (550 mm) el CC tuvo mayor EUA ( $8 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1}$  vs.  $6 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1}$ ). Ampliando, mediante simulación y un rango de condiciones meteorológicas posibles, se encontró que bajos niveles de ADi permiten alcanzar altos rendimientos, pero incrementan su variabilidad. Considerando que las ofertas hídricas (ADi+PP) de las tres campañas fueron, en general, superiores a 650 mm (valor límite para una tener respuesta al rendimiento), la eficiencia en el uso del agua del sistema se incrementó con la incorporación del doble cultivo, sin comprometer el rendimiento de soja.

**Palabras claves:** Agua disponible, eficiencia uso agua, eficiencia uso radiación, consumo de agua, doble cultivo

## ABSTRACT

The use of double crops improves the use of resources as water and radiation. However, this practice is often limited by the winter crop reduction on soil water, and its availability for the next crop. In this thesis, we evaluated the impact of initial available water (AWi) at sowing, due to the previous crop effect, on the yield and water consumption of soybean. Three agricultural seasons were analyzed in field experiments sown at Experimental Station of INTA Paraná, Entre Rios, on an acuíc Argiudol soil.

The treatments consisted in two crop sequences, fallow of corn/soybean (BB) and wheat/ soybean (TR), in addition, two moisture conditions were included in TR, two cultivars of different length: one representing a short cycle (CC, MG V short) and the other, a long cycle (CL, MG VI long). For each combination of predecessor/moisture condition and cultivar, we determined the dynamic of soil water consumption, and calculated both water and radiation use efficiencies (WUE and RUE, respectively). For the three periods, the water storage differences, determined at wheat maturity (BB -170 mm and TR-100 mm), were reduced with the advance of the rainy period (20-30 days after soybean sowing). When the soybean was sown on BB, the consumption was higher, 40-80 mm extra. However, there was no significant yield differences between treatments ( $p>0.05$ ) in the first two seasons, neither a clear relation with AWi at sowing ( $R^2=0.24$ ). The WUE and RUE differences were associated to the cultivar; in periods of substantial precipitation, such as season 3 (PP, +700 mm), where the WUE of CL (4.8 kg.mm<sup>-1</sup>) was higher than that of CC (3.8 kg.mm<sup>-1</sup>) while, with moderate rainfall as in season 1 (550 mm), the CC had higher WUE (8 kg.mm<sup>-1</sup> vs. 6 kg.mm<sup>-1</sup>). In a wider meteorological range, simulations suggested that low AWi at sowings did not prevent high yields of soybean, but increased their variability. Considering that the water supply (AWi + PP) of each soybean cycle was, in general, greater than 650 mm (limit value for a response to yield), we conclude that the double crop increases water use efficient at a system level, without compromising soybean yield.

**Palabras claves: double crops, available water, water use efficiency, radiation use efficiency, water consumption**

**CAPITULO 1:**  
**INTRODUCCIÓN GENERAL**

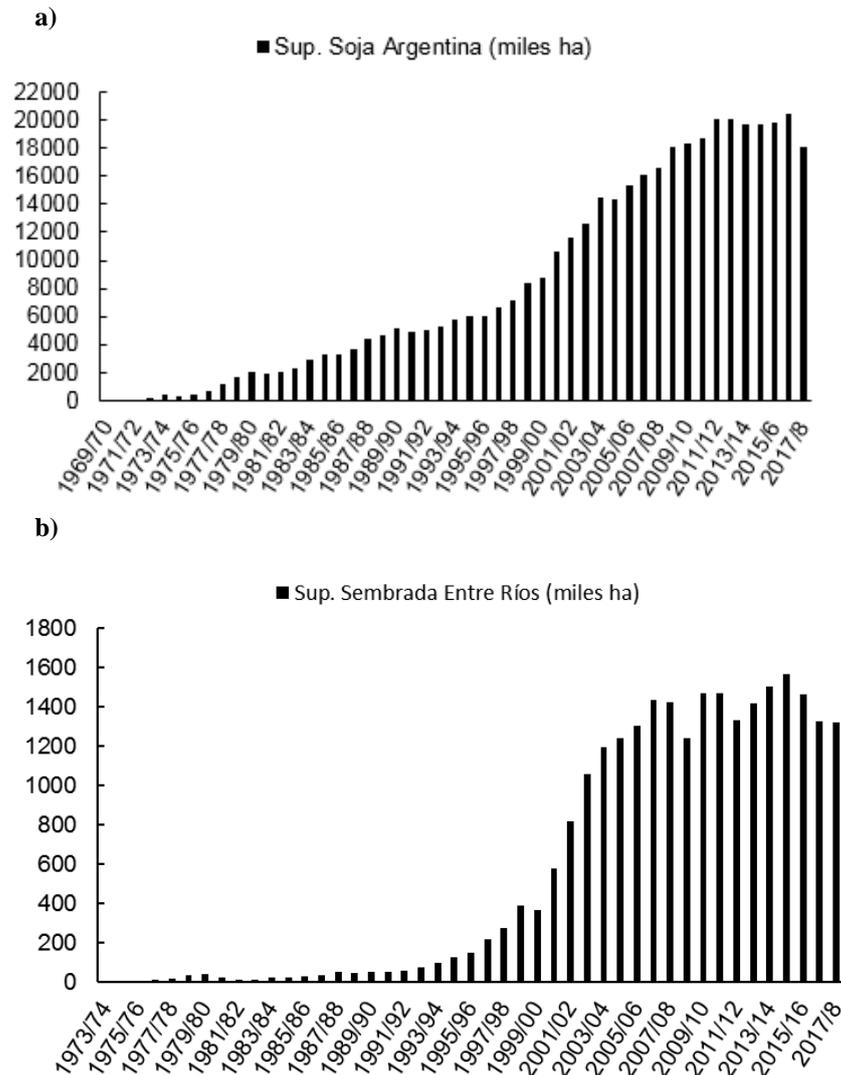
## 1.1 ANTECEDENTES

### 1.1.1 La soja en Argentina y Entre Ríos

En Argentina y, principalmente, en la región Pampeana, durante los últimos 30 años se ha experimentado un proceso de agriculturización simplificado. Este proceso ha avanzado hacia la simplificación de los esquemas de producción, en los que preponderan las especies primavero-estivales como la soja (*Glicine max*) y el maíz (*Zea mays*; Manuel-Navarrete et al., 2009; Restovich et al., 2012).

En este contexto actual, la soja es el cultivo más importante en el país: en los últimos cinco años, la superficie sembrada fue, en promedio de 19,6 millones de hectáreas lográndose una producción promedio de 55,6 millones de toneladas (Figura 1; MAGyP, 2018). Su expansión ha tenido una tendencia continua y progresiva a partir de su introducción en 1970, con un incremento aún más notable a partir de 1996 cuando se incorporaron cultivares genéticamente modificados, con resistencia al herbicida glifosato (Bert y Satorre, 2013). Las exportaciones argentinas alcanzan el tercer lugar en el mundo y el 84% de la producción se exporta como grano, harina, aceite y biodiesel (BCR, 2016).

En la provincia de Entre Ríos, el cultivo de soja también tuvo una expansión muy marcada hacia finales de los 90 (Figura 1.1.b) ocupando, en 2013/2014 el 65% (1.505.000 ha) del total de la superficie agrícola (MAGyP, 2018). Actualmente, su frecuencia en las rotaciones es de dos cada tres años, lo que refleja una proporción importante de sistemas basados en un único cultivo anual (Caviglia et al., 2013).



**Figura 1.1.a)** Superficie sembrada de soja (miles de hectáreas) en Argentina, período 1970-2017 y **b)** en Entre Ríos, período 1973-2014 (Fuente: MAGyP, 2018).

Los sistemas con soja como único cultivo anual y, en ausencia de un esquema de rotaciones, resultan frágiles y poco sustentables; asimismo, desaprovechan la captación de recursos como agua, radiación y nutrientes (Caviglia *et. al.*, 2008; Caviglia y Andrade, 2010; Viglizzo *et al.*, 2011), aumentan los riesgos de pérdidas de agua y nitrógeno por percolación profunda, propician la erosión hídrica, favorecen el ascenso de las napas y dificultan el control de malezas (Restovich *et al.*, 2012; Novelli, 2013; Nosetto *et al.*, 2015).

Por el contrario, los sistemas basados en la intensificación agrícola, con más de un cultivo al año, constituyen una estrategia que permite mejorar la eficiencia biológica y económica del sistema de producción (Caviglia y Andrade, 2010).

Conocer cómo es la captura de recursos por las diferentes especies de cultivos puede ser una herramienta para mejorar, tanto la productividad de los mismos, como la de la tierra.

### **1.1.2 La captación de recursos en los sistemas de únicos cultivos anuales vs. los doble cultivos**

El uso intensificado de la tierra constituye una herramienta para mejorar la sustentabilidad de los sistemas a través del mejor aprovechamiento de los recursos naturales (Caviglia et al., 2008).

La adopción de doble cultivos, en comparación con cultivos únicos en el año, incrementa la productividad anual de la tierra a través de una mayor captura de radiación y de agua disponible (Calviño et al., 2002; Caviglia et al., 2004; Van Opstal et al., 2011). Por ejemplo, Andrade et al. (2015) analizando varias combinaciones de secuencias doble cultivo, encontraron que la radiación fotosintéticamente activa interceptada y la evapotranspiración acumulada se incrementó en valores de 30-53% y 43-65%, respectivamente, cuando se evaluaron diferentes antecesores invernales/maíz vs. maíz y, aumentos entre 11-46% y 30-88% para el caso de antecesor invernal/soja vs. soja.

En el área pampeana del país, el modo más difundido de intensificación ha sido la secuencia trigo/soja (Calviño y Monzón, 2009; Caviglia y Andrade, 2010), principalmente por su estabilidad productiva y rentabilidad económica. Otras alternativas invernales, aunque con menor expansión son arveja (*Pisum sp*)/soja, colza (*Brassica napus*)/soja, arveja/maíz, o cebada (*Hordeum vulgare*)/soja (Andrade et al., 2015).

Para cualquier variante de intensificación que, involucre a dos o más cultivos por año, el rendimiento individual de cada uno de ellos puede verse reducido (Evans, 1993). Sin embargo, dado que los dobles cultivos utilizan los recursos de manera diferente, se espera que el efecto sobre la caída individual pueda contrarrestarse con un aumento en el rendimiento total en base anual (Evans, 1993; Andrade y Satorre, 2015).

De este modo, con los doble cultivos en la rotación se tienen mayores aprovechamientos de la radiación (Sinclair y Muchow, 1999) y de agua (Dardanelli et al., 2008) para el total del ciclo. Para el recurso agua, las mayores eficiencias, a nivel de sistema, no sólo se dan como consecuencia de un aumento de la evapotranspiración

acumulada por incluir más de un cultivo sino también por las menores pérdidas de agua generadas (Salado-Navarro y Sinclair, 2009).

#### *1.1.2.1 La soja en los sistemas doble cultivo. Impacto de la fecha de siembra y el agua disponible*

En una secuencia doble cultivo, las caídas en el rendimiento de la especie estival pueden estar asociadas a retrasos en la fecha de siembra, al situarla por fuera del momento óptimo para su crecimiento y desarrollo. En el caso de la soja, los atrasos en la siembra tienden a reducir los rendimientos potenciales debido a que su período crítico (desde R3 a R5.5 en la escala de Fehr y Caviness, 1977) queda expuesto a condiciones de radiación y fotoperiodo menos favorables para la definición del rendimiento (Egli y Bruening, 2000; Calviño et al., 2003a; Hu y Wiatrak, 2012; Nico et al., 2015). Con un adecuado manejo del espaciamiento y la densidad, los cultivares de soja de maduración temprana podrían contribuir a reducir las penalidades asociadas al retraso de la fecha de siembra (Egli y Bruening, 2000).

El efecto del retraso en la siembra es similar, aunque de diferente magnitud, para las diferentes zonas de la región pampeana: más pronunciado en altas latitudes (Andrade, 1995; Calviño et al., 2002; Calviño et al., 2003b) y menos en bajas (Battisti y Sentelhas, 2014), resultando intermedio en la región centro oeste de Entre Ríos (Peltzer et al., 2004; Peltzer y Santos, 2009; Santos et al., 2011). En el norte de Buenos Aires (Pergamino, San Pedro y Junín) se han obtenido reducciones promedio en el rendimiento del 31-34% a partir de siembras de octubre (Andrade et al., 2015). Mientras tanto, para el centro-oeste de Entre Ríos, los rendimientos alcanzables son máximos en siembras desde septiembre hasta mediados de diciembre; recién después de este rango de fechas óptimas se han observado disminuciones de 51 kg ha<sup>-1</sup> por día de atraso (Peltzer et al., 2004). Sin embargo, para esta región, la fecha de cosecha del trigo permite realizar la siembra de soja hasta 25 días antes de que los rendimientos alcanzables comiencen a caer (Coll et al., 2011).

Otro aspecto a considerar en la adopción de secuencias de doble cultivos en secano es que el consumo de agua del antecesor podría comprometer la disponibilidad hídrica para el cultivo estival (Daniels y Scott, 1991; Lehrs et al., 1994). Si bien varios estudios destacan que el agua acumulada previa a la siembra puede condicionar la dinámica del uso del agua durante el ciclo de la soja (Carfagno et al., 2013; Restovich et al., 2012; Pietrarrelli et al., 2014) los efectos finales sobre el rendimiento no son

claros. Por un lado, simulaciones realizadas para la zona de Marcos Juárez (provincia de Córdoba), encontraron que el rendimiento de soja fue mayor en rotaciones trigo/soja en dos de cinco campañas, mientras que resultó mayor en soja continua en las tres restantes (Salado-Navarro y Sinclair, 2009).

Por otro lado, Monzón et al. (2007) en estudios de simulación con una base de treinta y tres años para el sudeste de la región Pampeana, encontraron que la frecuencia de distribución del rendimiento de soja (en una secuencia doble cultivo trigo/soja), presentó respuesta al AD determinada a la madurez fisiológica del trigo, en coincidencia con estudios realizados en ambientes de mayores latitudes (Egli, 1998; Calviño et al., 2003b).

Además del agua acumulada durante el barbecho y el consecuente efecto del antecesor, se reconoce que la productividad del cultivo está fuertemente influenciada por la precipitación durante el ciclo (Egli y Bruening, 2000; Sinclair et al., 1992; Salado-Navarro y Sinclair, 2009) y que las reducciones en el rendimiento están mayormente influenciadas por los cambios que puedan ocurrir desde la floración al inicio de formación de semillas y por la capacidad de compensación entre los componentes de rendimiento (Schou et al., 1978; Calviño et al., 2003b; Torrión et al., 2014).

Puede suponerse que la relevancia del agua almacenada previa a la siembra o, como contracara, del consumo de agua por un cultivo antecesor invernal durante la primavera, podrá ser diferente de acuerdo a cuánta agua sea consumida con anterioridad al período crítico de la soja.

#### *1.1.2.2 Los grupos de madurez en soja, su relación con el agua disponible a la siembra y el consumo durante el ciclo*

En soja, las duraciones del período vegetativo varían en relación a los diferentes grupos de madurez (GM); estos grupos difieren en la sensibilidad fotoperiódica y permiten explorar distintas ventanas agroclimáticas en post-floración (Egli, 1994; Lee y Grabau, 1992; Kantolic y Slafer, 2001). Así, el GM elegido en combinación con la fecha de siembra ubicará el período crítico del cultivo en condiciones más o menos favorables para la determinación del rendimiento potencial (Egli y Bruening, 2000; Kantolic, 2008) y condicionará también los rendimientos reales a través de la dinámica hídrica a lo largo del ciclo y, especialmente, las condiciones de oferta y demanda de agua durante la etapa crítica. En este sentido, Dardanelli et al. (2004) determinaron

diferencias en el mínimo contenido de agua alcanzado al final del ciclo por distintos genotipos de soja bajo condiciones de sequía; en coincidencia con su ciclo más largo, un cultivar de GM VII tuvo mayor capacidad de extraer agua del perfil que uno del GM V y mucho mayores que otro del GM III.

Más aún, el uso de modelos de simulación agronómica ha permitido establecer que un menor consumo de agua previo a floración asociado a un ciclo vegetativo más corto, tiende a preservar el agua del suelo mejorando la disponibilidad hídrica durante las fases reproductivas (Kantolic et al., 2007).

Es decir que, mayores contenidos de agua a la siembra en cultivares de ciclo corto, además de poder contribuir a optimizar el crecimiento vegetativo y la captura de radiación – frecuentemente limitante en estos grupos- podrían contribuir a mantener un nivel hídrico más estable y favorable en el período crítico. En cambio, en los cultivares de ciclo mayor, con mayor duración de la etapa pre-floración y mayor crecimiento vegetativo, el agua disponible a la siembra difícilmente contribuya a sostener el consumo de agua en el período crítico, resultando éste sólo dependiente de la oferta de agua por precipitaciones más cercanas al período en que se define el rendimiento.

De ser cierta esta afirmación, en Entre Ríos sería posible mejorar la EUA para generar rendimiento ( $EUA_R$ , expresada en kg de grano de soja por mm de agua disponible durante todo el ciclo) reduciendo el GM del cultivar a implementar. Sin embargo, no está claro qué ocurriría si la disponibilidad de agua inicial es reducida por la presencia de un cultivo antecesor a la soja.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo general**

Evaluar el impacto del volumen de agua disponible inicial ( $AD_i$ , a la siembra) sobre el consumo de agua, el rendimiento y la eficiencia de uso del agua en genotipos de soja de diferentes ciclos para el centro-oeste de Entre Ríos, sobre secuencias barbecho/soja y trigo/soja.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

A. Frente a diferente disponibilidad de agua a la siembra de soja, en combinación con ofertas diferenciales de agua en post-floración:

i. Determinar la dinámica del consumo de agua para cada sistema evaluado, a lo largo del ciclo en cultivares de soja de diferente GM, caracterizando la condición hídrica en período crítico (PC).

ii. Estimar la eficiencia en el uso del agua (en términos de rendimiento,  $EUA_R$ ) para ambos ciclos de cultivos en asociación con diferentes sistemas.

iii. Identificar el impacto del antecesor sobre los componentes del balance de agua.

iv. Cuantificar el impacto del ADi a la siembra sobre el rendimiento.

B. Estimar mediante modelos de simulación, para la región de centro-oeste de Entre Ríos, la variabilidad de rendimientos de ambos GM frente a cambios en el AD a la siembra y a la oferta durante el PC.

### 1.3 HIPÓTESIS

En relación a los objetivos antes mencionados se propone que:

I.

- a) El agua almacenada en el perfil a la siembra de un cultivar de ciclo corto (CC) contribuye al consumo de agua durante el período reproductivo.
- b) Por el contrario, para un cultivar de ciclo largo (CL) el agua almacenada a la siembra se agota durante el período vegetativo y no impacta sobre el consumo de agua durante las etapas reproductivas.

II. Un bajo contenido de agua almacenada a la siembra de soja, reducirá la  $EUA_R$  de un cultivar de CC, sin afectar la del CL.

III. Para condiciones simuladas en escenarios multi-anales para el clima y suelo de la región centro oeste de Entre Ríos:

- a) La variabilidad de los rendimientos ante diferente oferta de agua inicial, debida a distintos escenarios hídricos previos a la siembra, es mayor en variedades de CC respecto a las de CL.
- b) En escenarios con óptimos contenidos de agua a la siembra, próximos a capacidad de campo, los mayores rendimientos se obtienen con CC.

## **1.4 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS**

El cuerpo de la presente tesis ha sido desarrollado en cinco capítulos, el primero de ellos “Introducción General” recopila antecedentes y conocimientos vigentes sobre la temática abordada. Además, plantea los objetivos e hipótesis del trabajo.

Los apartados siguientes se componen de una introducción más detallada sobre el tema específico a tratar, materiales y métodos implementados, los resultados y discusiones generadas.

El Capítulo 2, principalmente estudia las condiciones hídricas que se manifestaron para las diferentes etapas de desarrollo de los cultivos y esquematiza la dinámica de uso del agua para las estrategias productivas empleadas. El Capítulo 3 aborda aspectos referidos al crecimiento, la productividad y las relaciones de eficiencia en el uso de los recursos, agua y radiación. El Capítulo 4 presenta una simulación de las condiciones estudiadas comparadas con los resultados obtenidos a campo; además, explora situaciones meteorológicas hipotéticas. Por último, el Capítulo 5 incluye una conclusión general, integrando los resultados y discusiones desarrolladas en los anteriores.

**CAPITULO 2:**  
**CONSUMO DE AGUA EN SOJA DE DIFERENTES**  
**CICLOS, SEGÚN ANTECESOR**

## 2.1 INTRODUCCIÓN

El agua disponible (AD) para los cultivos resulta del balance entre el agua proveniente de las precipitaciones y los procesos de transpiración, infiltración de suelo, percolación profunda y evaporación; la relevancia de cada proceso es específica de cada sitio y es afectada por diversos factores del ambiente y de manejo. Es así que, la oferta hídrica para un cultivo está representada no sólo por el régimen hídrico durante el ciclo sino también por el agua disponible inicial, acumulada en el suelo durante el período de barbecho.

Conceptualmente, el AD es aquella que permanece retenida entre los potenciales mátricos de capacidad de campo (i.e. -33 kPa) y punto de marchitez permanente (PMP, - 1500 kPa), pudiendo ser extraída por el cultivo (Damiano y Taboada, 2000). En suelos francos, la cantidad potencial de AD es de 130-140 mm por metro de perfil y su aprovechamiento varía con cada especie o cultivar (Dardanelli et al., 2008).

El umbral de contenido hídrico del suelo en el cual se manifiesten restricciones para el crecimiento depende de la combinación de la oferta hídrica, la demanda atmosférica y el estado ontogénico del cultivo (Andrade y Sadras, 2000). Dependiendo del cultivar y período de crecimiento, la soja de primera siembra requiere entre 450 y 700 mm de agua mientras que la de segunda, entre 350 y 550 mm (Doorenbos y Kassam, 1979 cit. Dogan et al., 2007; Andriani, 2000). Además, considerando que el 65% de la evapotranspiración del cultivo de soja ocurre entre los estadíos de R3 y R5 (Karam et al., 2005) resulta importante adecuar el ciclo del cultivo, según la disponibilidad hídrica y el patrón de precipitaciones.

La soja en una secuencia de doble cultivo generalmente se siembra con baja disponibilidad de agua en el suelo debido al consumo previo del antecesor (Calviño et al., 2003). No obstante, Restovich et al. (2008) en Pergamino, señalaron que la incorporación de cultivos de cobertura (CdeC) que se secan oportunamente (antes de la etapa reproductiva) permite generar un tiempo suficiente para la recarga de agua del perfil. También, experiencias similares en Paraná sugieren que si la supresión de estos es previa o, al inicio del período lluvioso de primavera, su inclusión no afectaría el contenido de agua en el suelo a la siembra (Caviglia y Andrade, 2010). No obstante, cuando se trata de un cultivo antecesor destinado a ser cosechado como grano, como es el caso del trigo, no puede asegurarse que la finalización de su consumo garantice la recarga del perfil.

Considerando que en Paraná, la fecha de cosecha del trigo permite realizar la siembra de soja hasta 25 días antes de que los rendimientos máximos alcanzables comiencen a caer (Coll *et al.*, 2011), en este capítulo se analiza el impacto del AD a la siembra sobre la dinámica del agua en el suelo y su consumo, comparando dos cultivares de soja de diferente ciclo.

## **2.2 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.2.1 Tratamientos y diseño experimental del ensayo**

Los ensayos tuvieron lugar en el campo experimental de la EEA INTA Paraná (Lat. - 31.44, Long. 60.31, 110 m.s.n.m), situada en inmediaciones de la localidad de Oro Verde, departamento Paraná, Provincia de Entre Ríos durante tres campañas, 2013/4, 2014/5 y 2016/7 (también mencionadas como Campaña 1, 2 y 3 de aquí en adelante). La serie de suelo que caracterizó a los lotes seleccionados fue Tezanos Pinto (ver descripción en Apéndice), identificada como un suelo Argiudol ácuico (Plan de Mapa de Suelos, 2000).

Se utilizó un diseño experimental en bloques completos al azar (DBCA), con arreglo espacial de los tratamientos en parcelas divididas con tres repeticiones. Para todos los casos el factor de bloqueo fue la pendiente del terreno; dentro de los bloques, las parcelas principales estuvieron asociadas al cultivo antecesor, trigo (TR) o barbecho maíz (BB) y las subparcelas relacionadas a la variedad (Tabla 2.1). En las Campañas 2 y 3, se tuvo una variante extra al antecesor trigo, definido por la condición hídrica a la siembra de la soja. Por un lado, se tuvo trigo y condiciones normales de precipitación entre la madurez fisiológica (MF) de éste y la siembra de soja (tratamiento TR) y por otro, parcelas que provenientes de trigo se les manipuló la condición hídrica entre su madurez y la siembra de soja (tratamiento TRs), mediante la instalación de cubiertas plásticas (shelters “rain out”) similares a los descriptos por Andriani *et al.*, 1991. Estas cubiertas se colocaron avanzado la fase de grano pastoso con el objetivo de reducir la oferta hídrica edáfica, que suele ser considerable por las precipitaciones de la época.

**Tabla 2.1** Esquema de los tratamientos evaluados según cada campaña. Antecesor a soja: barbecho maíz (BB) y trigo, con condiciones hídricas a la siembra normales (TR) y modificada (TRs). Grupo de madurez de soja (GM), ciclo corto (CC) y ciclo largo (CL).

<b>Campaña</b>	<b>Antecesor</b>	<b>Condición hídrica a la siembra</b>	<b>GM</b>
2013/4	Barbecho Maíz	Normal (BB)	CC
		Normal (BB)	CL
	Trigo	Normal (TR)	CC
		Normal (TR)	CL
2014/5 y 2016/7	Barbecho Maíz	Normal (BB)	CC
		Normal (BB)	CL
	Trigo	Normal (TR)	CC
		Normal (TR)	CL
		Modificada (TRs)	CC
		Modificada (TRs)	CL

Para la siembra de trigo se utilizaron cultivares de ciclo corto, a una densidad de 130 kg ha<sup>-1</sup> para lograr stands de 250-280 plantas/m<sup>2</sup>, en la Campaña 1 el cultivar empleado fue Baguette 501 y en las 2° y 3°, Klein Tauro. Las fechas de siembra fueron entre el 25 de junio y 6 de julio.

En soja se usó como grupo de madurez (GM) de ciclo corto (CC) a la variedad NA5009 RG y como ciclo largo (CL) la DM6.8i RR (de aquí en adelante se hace referencia específica a estos dos cultivares como CC y CL, respectivamente), ambas de hábito de crecimiento indeterminado y ampliamente difundidas en la región. Las fechas de siembra para Campaña 1 fueron el 02 de diciembre, 29 de noviembre para la 2° y, 06 de diciembre para la 3°, ajustándose las mismas al rango de fechas óptimas para la zona. El espaciamiento entre surcos fue de 52 cm, con una densidad de siembra de 28 pl.m<sup>-2</sup>; se realizaron controles químicos habituales para mantener el ensayo libre de malezas y plagas.

## **2.2.2 Registro de datos y cálculo de variables**

### *2.2.2.1 Datos Meteorológicos*

Los datos meteorológicos fueron tomados de la estación situada en la EEA INTA Paraná. Se tomaron registros de precipitación (PP, mm), radiación global (Rg, MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>), temperatura media (Tm, °C), humedad relativa (HR, %) y evapotranspiración potencial diaria (ETP, mm día<sup>-1</sup>), estimada según FAO Penman-Montheith (Allen *et al.*, 1998).

Para caracterizar el régimen de PP de cada campaña se analizó la probabilidad de ocurrencia (Ec. 1) de los milímetros registrados para el período siembra trigo- siembra soja y, para el periodo siembra- madurez fisiológica de la soja, en relación a una serie de diecisiete años (2000/1-2016/7).

$$\text{Probabilidad (\%)} = N^{\circ} \text{ de Orden} / (N+1) * 100 \quad (1)$$

Donde Número de orden, surge del ordenamiento de los volúmenes de lluvia de mayor a menor y N es el número total de años de la serie.

#### 2.2.2.2 Fenología

En forma periódica, se registraron las etapas fenológicas de los dos cultivares de soja, de acuerdo con la escala propuesta por Fehr y Caviness (1977). Las observaciones se realizaron en los surcos centrales de cada sub-parcela, evitando los bordes, con una frecuencia semanal.

#### 2.2.2.3 Humedad de suelo

La humedad de suelo se registró quincenalmente en trigo y soja desde la siembra hasta finalizado el ciclo de ambos cultivos; para ello se utilizó una sonda de neutrones (TROXLER 4300) y se instalaron, en el centro de cada parcela, los tubos de acceso necesarios, de material aluminio y 2 m de longitud. Las mediciones se realizaron cada 15 cm en los primeros 30 cm de profundidad del suelo, cada 10 cm entre 30 y 60 cm de profundidad y cada 20 cm entre 60 y 160 cm.

#### 2.2.2.4 Agua disponible

A partir del dato de lectura de sonda de neutrones, se estimaron los valores la lámina de agua disponible actual ( $Lam_a$  en mm, Ec. 2 y 3) por estrato de medición.

Para primer estrato, de 0 a 15 cm:

$$Lam_a = [(Lam_x/STD) * 0,3728 + 0.0262] * 150 \quad (2)$$

Para los estratos posteriores a 15 cm:

$$Lam_a = [(Lam_x/STD) * 0,3056 + 0.0936] * E \quad (3)$$

Donde  $Lam_x$  es el valor de lectura de sonda,  $STD$  es el valor estándar tomado por la sonda y  $E$  (mm) es la profundidad de cada estrato que se mide a partir de los 15 cm. Estas ecuaciones de ajustes fueron las calibradas por Albarenque (2015), para el mismo sitio de estudio.

La diferencia entre la cantidad de agua en un momento determinado y el límite inferior (Li) determina el agua disponible para el cultivo (AD, Ec. 4). El límite inferior se refiere al contenido de agua en el suelo a partir del cual las plantas dejan de extraer agua y manifiestan síntomas de marchitez parcial o total como resultado del estrés hídrico.

$$AD = Lam_a - Li \quad (4)$$

Donde Li puede estimarse tomando como referencia el PMP. Los valores utilizados fueron los obtenidos Wilson (datos no publicados (ver Apéndice) para la serie Tezanos Pinto.

Los datos de humedad también fueron expresados como porcentaje de agua útil (AU), a partir de la relación entre el AD para un momento dado y la diferencia entre capacidad de campo y PMP (Ec. 5).

$$\%AU = AD / (\text{Capacidad de campo} - PMP) \quad (5)$$

Para la profundidad máxima, con la cual se midió con la sonda de neutrones (160 cm), el contenido de agua a capacidad de campo es de 638 mm y el PMP, de 398 mm. Esto implica que la capacidad de almacenamiento de AU para ese estrato de medición es de 240 mm.

#### 2.2.2.5 Consumo de agua

El consumo de agua por el cultivo (Ec. 6) se calculó como la diferencia entre el almacenaje de agua en el perfil de suelo entre el inicio (ADi) y el final de cada período considerado (ADf) y la suma de las precipitaciones efectivas (PPef, Ec. 7 y 8 según método USDA) ocurridas (adaptado de Carfagno et al., 2013; Andrade et al., 2015):

$$\text{Consumo} = (ADi - ADf) + PPef \quad (6)$$

$$PPef = Pp (125 - 0,2 Pp / 125) \quad \text{para } Pp < 250 \text{ mm} \quad (7)$$

$$PPef = 125 + 0,1 Pp \quad \text{para } Pp > 250 \text{ mm} \quad (8)$$

#### 2.2.3 Análisis estadístico

Para las variables AD en madurez fisiológica (MF) en trigo, AD a la siembra y consumo total en soja se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) utilizando el programa estadístico Infostat (Di Rienzo et al., 2017). La comparación de medias entre tratamientos fue mediante el test de Duncan, con un error del 5%.

También se representó la dinámica del agua en el suelo, comparando los tratamientos con modelos mixtos. Para ello se utilizó la técnica de medidas repetidas en el tiempo o en el espacio, cuando se analizó la variación del almacenamiento en profundidad. La comparación de medias se realizó con la prueba DGC (Di Rienzo, Guzmán y Casanoves, 2002).

La correlación entre las variables consumo, AD, PP y AD+PP fue determinada mediante los coeficientes de Pearson (5%).

## 2.3 RESULTADOS

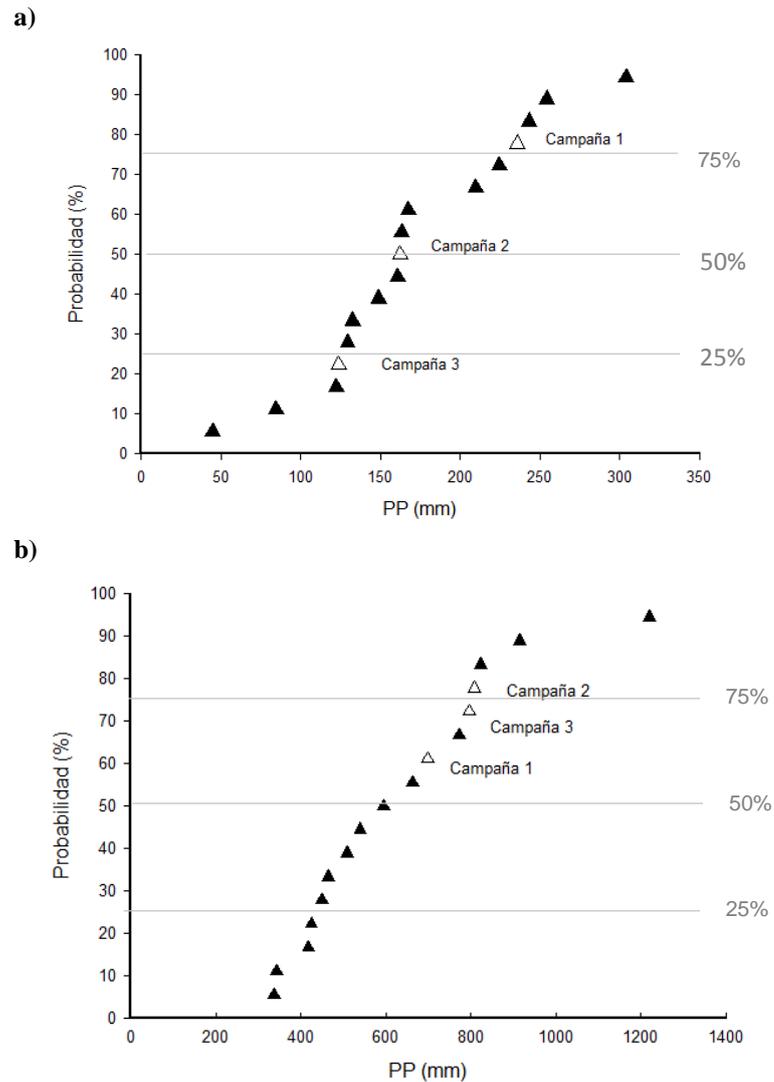
### 3.3.1 Caracterización meteorológica

El promedio anual de precipitaciones calculadas para una serie de 17 años en Paraná (2000/01-2016/17) fue de 1170 mm y el de la ETP, de 1274 mm. La Campaña 1, en comparación con el promedio anual de la serie y de los otros dos períodos estudiados, fue la más desfavorecida en el balance PP - ETP (Tabla 2.2).

**Tabla 2.2.** Datos anuales (julio-junio) de precipitación (PP, mm) y evapotranspiración (ETP, mm).

		PP anual (mm)	ETP anual (mm)
Promedio serie	2000/17	1170	1274
Campaña 1	2013/14	1048	1334
Campaña 2	2014/15	1146	1256
Campaña 3	2016/17	1193	1240

En lo que respecta a las precipitaciones ocurridas durante el período próximo a la siembra de soja (01 noviembre -15 diciembre), la Campaña 1 se ubicó en el cuartil de los años más húmedos (236 mm, éste caudal sólo se superaría el 25 % de los años) en tanto que, la Campaña 2, estuvo cerca del promedio (162 mm) y la 3ª, dentro de las más secas (Figura 2.1.a). En lo que concierne específicamente, al ciclo de la soja, se tuvo un régimen húmedo para las tres campañas. La Campaña 1, a pesar de ser la menos lluviosa para dicho periodo, se ubicó como el resto por encima de la mediana (Figura 2.1.b).



**Figura 2.1.** Distribución de la probabilidad de ocurrencia (%) de las precipitaciones para una serie de 17 años (2000/01-2016/7) para **a)** fin de ciclo trigo/siembra soja y **b)** ciclo aproximado de crecimiento de la soja (1° diciembre a 30 abril). Los símbolos vacíos indican las campañas estudiadas y las líneas horizontales del gráfico indican cuartiles para el eje y.

### 3.3.2 Fenología

El cultivar NA5009 tuvo un ciclo promedio de 132 días, considerando desde la siembra al momento de la cosecha (estado de R8), mientras que DM6.8i tuvo una duración de 143 días. DM6.8 floreció, según la campaña entre 15 y 21 días después que NA5009, alcanzando MF (estado de R7) entre 13 y 16 días después que el ciclo más corto.

Se destaca que, para la Campaña 3, hubo un retraso en la emergencia por falta de humedad edáfica (Tabla 2.3).

**Tabla 2.3.** Fechas fenológicas de los cultivares NA5009 y DM6.8i, para las tres campañas de evaluación.

<b>Campaña</b>	<b>Cultivar</b>	<b>S</b>	<b>VE</b>	<b>R1</b>	<b>R3</b>	<b>R5</b>	<b>R7</b>	<b>Días R1- R5</b>	<b>Días R5- R7</b>
2013/4	NA5009	2dic	09dic	13 ene	02feb	17feb	28mar	34	37
	DM6.8		09dic	27 ene	13feb	26 feb	15abr	30	48
2014/5	NA5009	29nov	04dic	05 ene	26ene	12 feb	30mar	38	46
	DM6.8		04dic	26 ene	10 feb	28 feb	15abr	33	46
2016/7	NA5009	6dic	20dic	20 ene	4 feb	24 feb	27mar	31	31
	DM6.8		20dic	04 feb	17 feb	8 mar	10abr	32	33

S: siembra, VE: emergencia, R1, R3, R5, R7 estados reproductivos (Fehr y Caviness, 1977)

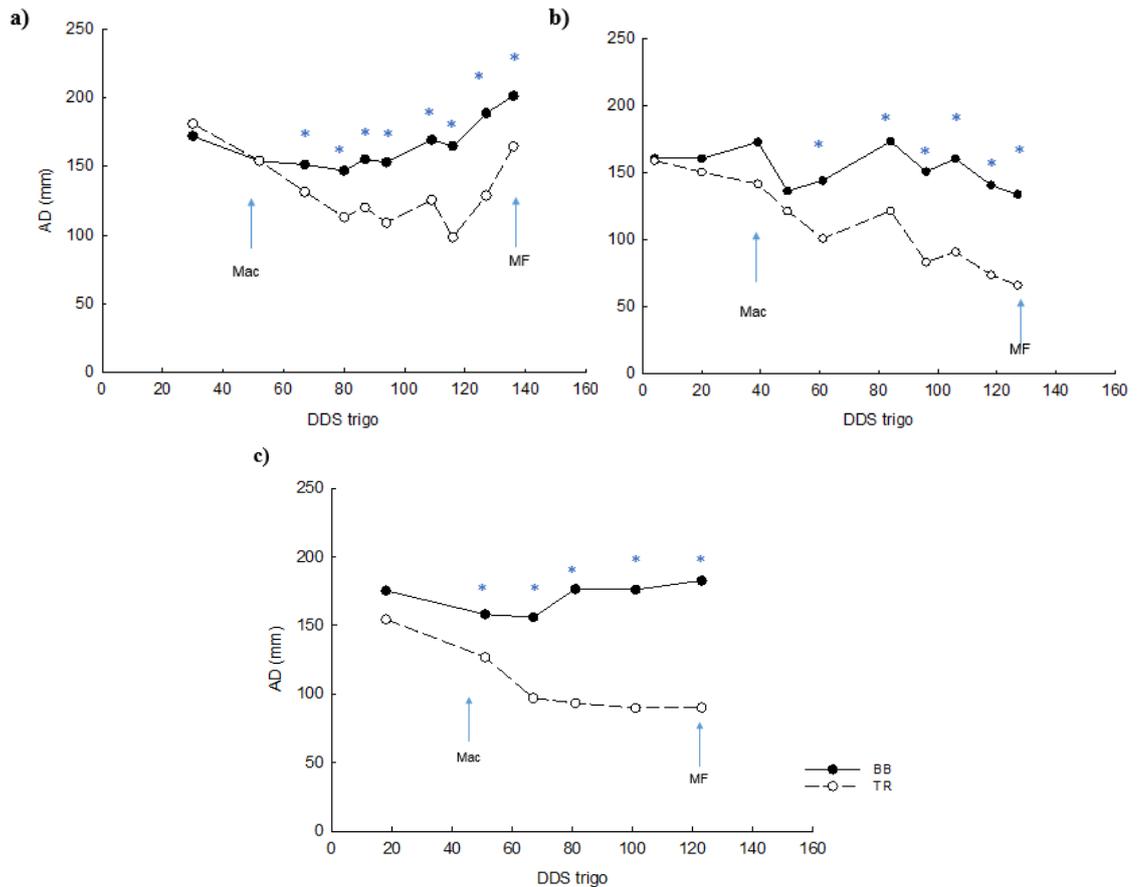
### 3.3.3 Condiciones hídricas de perfil de suelo

#### 3.3.3.1 Condiciones hídricas previas y durante la siembra de soja

En general, el almacenamiento de agua durante el ciclo del trigo se mantuvo, tanto en los tratamientos BB y TR, entre los 100 y 200 mm AD (esto representa 40-80% AU, Figura 2.2).

La dinámica del agua en los dos perfiles de suelo analizados, BB y TR, comenzaron a diferenciarse una vez avanzado el ciclo del trigo, luego de la fase de macollaje. Las diferencias se manifestaron a partir de los 67 DDS en la Campaña 1 ( $p < 0,01$ ), a los 39 DDS en la 2° ( $p < 0,0001$ ) y, a los 51 DDS en la 3° ( $p < 0,0001$ ); las mismas permanecieron y, se hicieron más evidentes hacia la MF del cultivo (Figura 2.2).

El total de agua consumida por el cultivo invernal fue de 259 mm para la Campaña 1, 292 mm para la 2ª y 293 mm para la 3ª. Aunque los consumos fueron similares, en la Campaña 3 la diferencia entre el contenido hídrico final en TR y en BB fue mayor que en las anteriores, llegando a ser de 90 mm (Figura 2.2.c).



**Figura 2.2.** Agua disponible (AD) a 1,60 m durante el ciclo del trigo, expresado en días desde su siembra (DDS). **a)** Campaña 2013/4, **b)** Campaña 2015 y **c)** Campaña 2016/7. Círculos llenos indican tratamiento barbecho/soja (BB) y círculos vacíos, trigo/soja de segunda (TR). Los asteriscos indican diferencias significativas entre los tratamientos ( $p < 0,05$ ) y las flechas momentos de macollaje (Mac) y madurez fisiológica (MF).

Tanto al finalizar el ciclo del trigo como a la siembra de la soja, los mayores niveles de humedad del suelo se presentaron en el tratamiento BB (Tabla 2.4). A la MF del trigo, las diferencias relativas de AU entre BB y TR fueron de 20, 30 y 40% para Campaña 1, 2 y 3, respectivamente ( $p < 0,05$ ). A la siembra de la soja, una mayor humedad también estuvo asociada al tratamiento BB aunque las diferencias con respecto a los dos restantes, TR y TRs, se atenuaron (las diferencias de AU fueron -10% con respecto a registrada a la MF trigo). De hecho, para la Campaña 1, las diferencias generadas por el antecesor ya no fueron significativas ( $p > 0,05$ ).

Los shelters/cubiertas plásticas colocados en las Campañas 2 y 3 no fueron eficaces en reducir notablemente el agua, con respecto al antecesor TR.

**Tabla 2.4.** Agua disponible (AD, mm) a una profundidad de 1,6 m, a la madurez fisiológica del trigo (MF) y siembra de soja, para las tres campañas en evaluación y sobre tratamientos con barbecho (BB), trigo (TR), trigo + shelter (TRs). Valores entre paréntesis indican equivalente de AD como porcentaje de agua útil.

Antecesor	2013/4		2014/5		2016/7	
	MF trigo	Siembra soja	MF trigo	Siembra soja	MF trigo	Siembra soja
<b>BB</b>	200 (83%) b	163 (68%)	134 (56%) b	142 (59%) b	182 (76%) b	161 (67%) b
<b>TR</b>	152 (63%) a	135 (56%)	65 (27%) a	95 (39%) a	90 (38%) a	96 (40%) a
<b>TRs</b>	-	-	-	83 (34%) a	-	128 (54%) ab
p-value	<0,0001	0,33	0,0004	0,04	0,013	0,013

*Nota:* Letras distintas en una misma columna y año indican diferencias significativas entre los tratamientos ( $p < 0,05$ ).

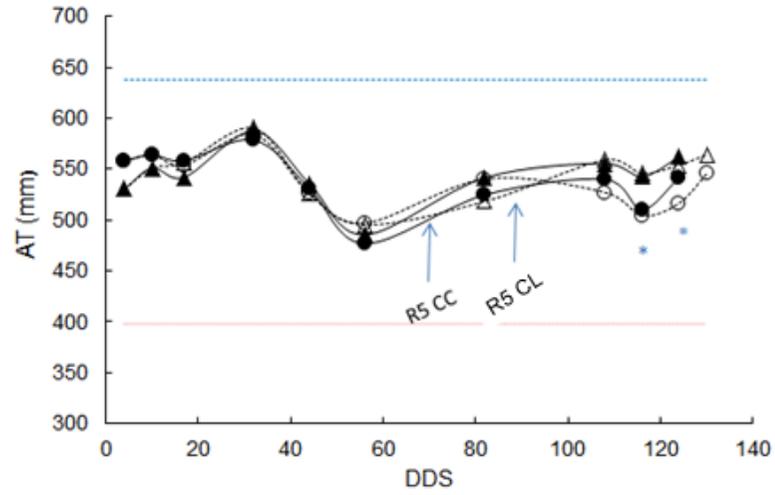
### 3.3.3.2 Condiciones hídricas del suelo durante el crecimiento de la soja

Durante el crecimiento del cultivo de soja, el agua total (AT) almacenada en el suelo se mantuvo en general siempre por encima de los 500 mm ( $\approx 100$  mm de AD); si bien se registraron contenidos de humedad menores al mencionado, en ninguna situación resultaron por debajo del PMP. El valor más próximo a este parámetro fue registrado en la 3° campaña, hacia el final del ciclo (Figura 2.3.e); aunque las condiciones más desfavorables en el período crítico (PC) del cultivo ocurrieron en la Campaña 2. Para este período se produjeron, simultáneamente, bajos contenidos de agua almacenada y un balance PP-ETP negativo (Figuras 2.3.c y d).

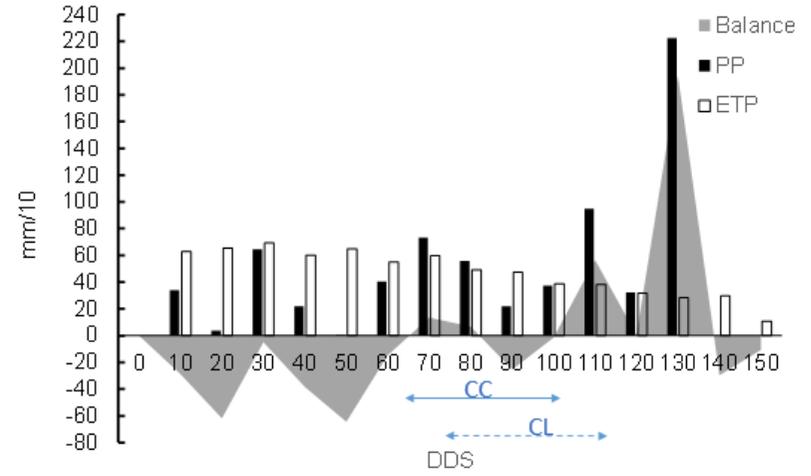
Por otro lado, se determinaron diferencias entre los tratamientos asociadas al efecto del antecesor (Tabla 2.5). Al inicio del ciclo de crecimiento de la soja, los valores más bajos estuvieron relacionados a la presencia de trigo. Este escenario se manifestó durante los primeros días del cultivo de soja ( $p < 0,05$ ) pero luego, durante la mayor parte del ciclo, el contenido de AT en el suelo tuvo una dinámica independiente del antecesor (Figura 2.3). A la inversa de lo ocurrido durante el inicio del desarrollo, en las Campañas 1 y 2, el tratamiento BB finalizó el ciclo con -20 mm respecto a TR y en la Campaña 3°, -10 mm y -35 mm con respecto a Tr y TRs (Figura 2.3).

En relación al GM, para las Campañas 1 y 2 no hubo efectos significativos sobre el AT ( $p > 0,05$ ); sólo para la 3° campaña hubo una diferencia de -14 mm en el perfil de los tratamientos CL aunque, sin relevancia ya que esto ocurrió hacia los 120 DDS, cuando el CC estaba alcanzando la madurez ( $p < 0,05$ , Tabla 2.5).

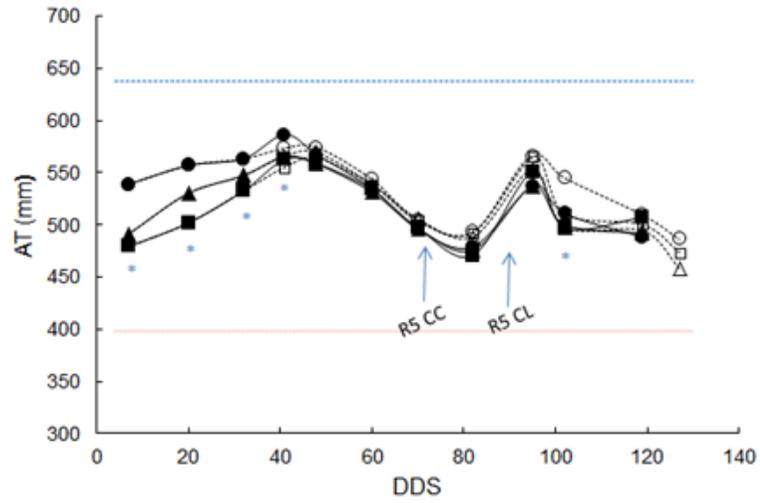
a)



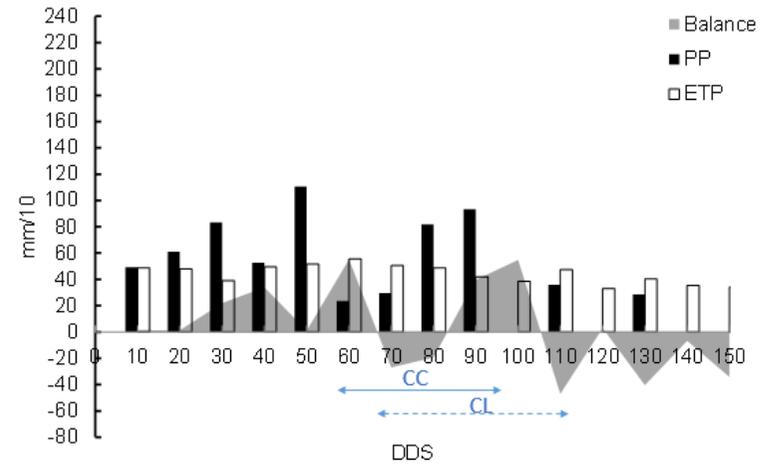
b)

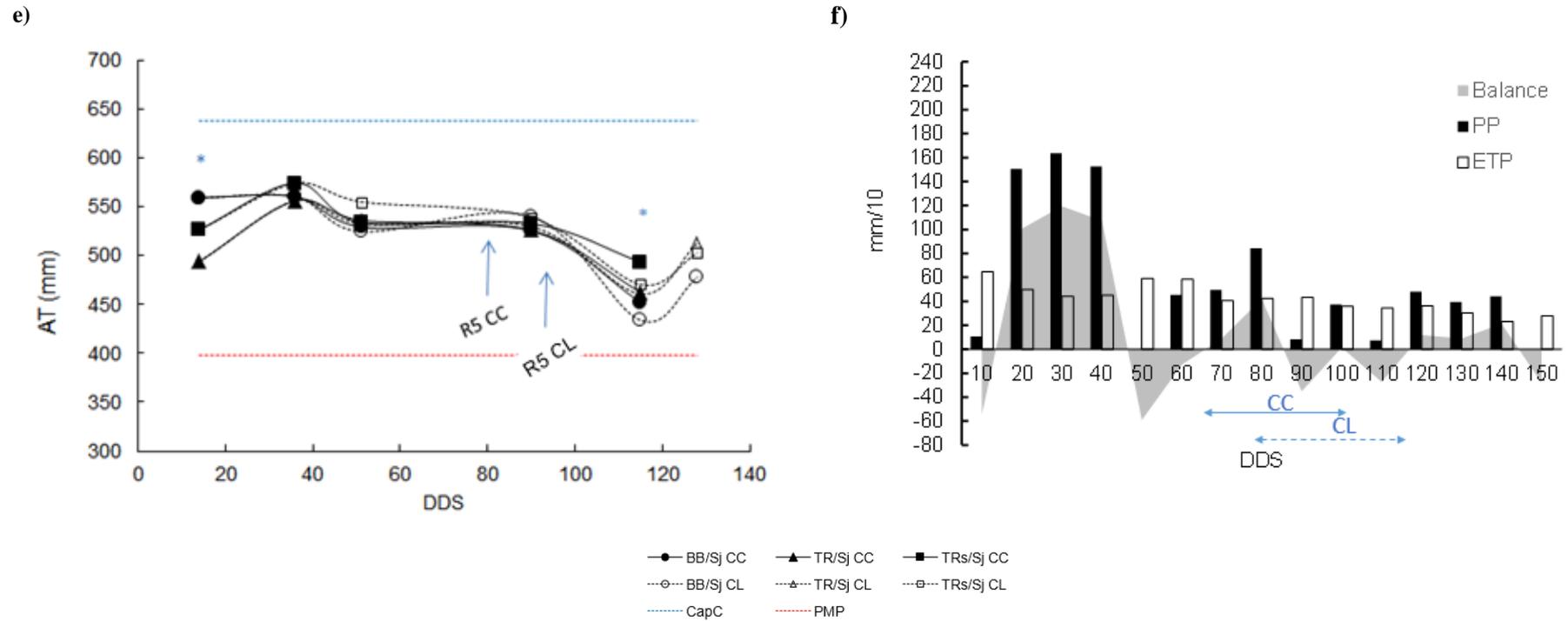


c)



d)





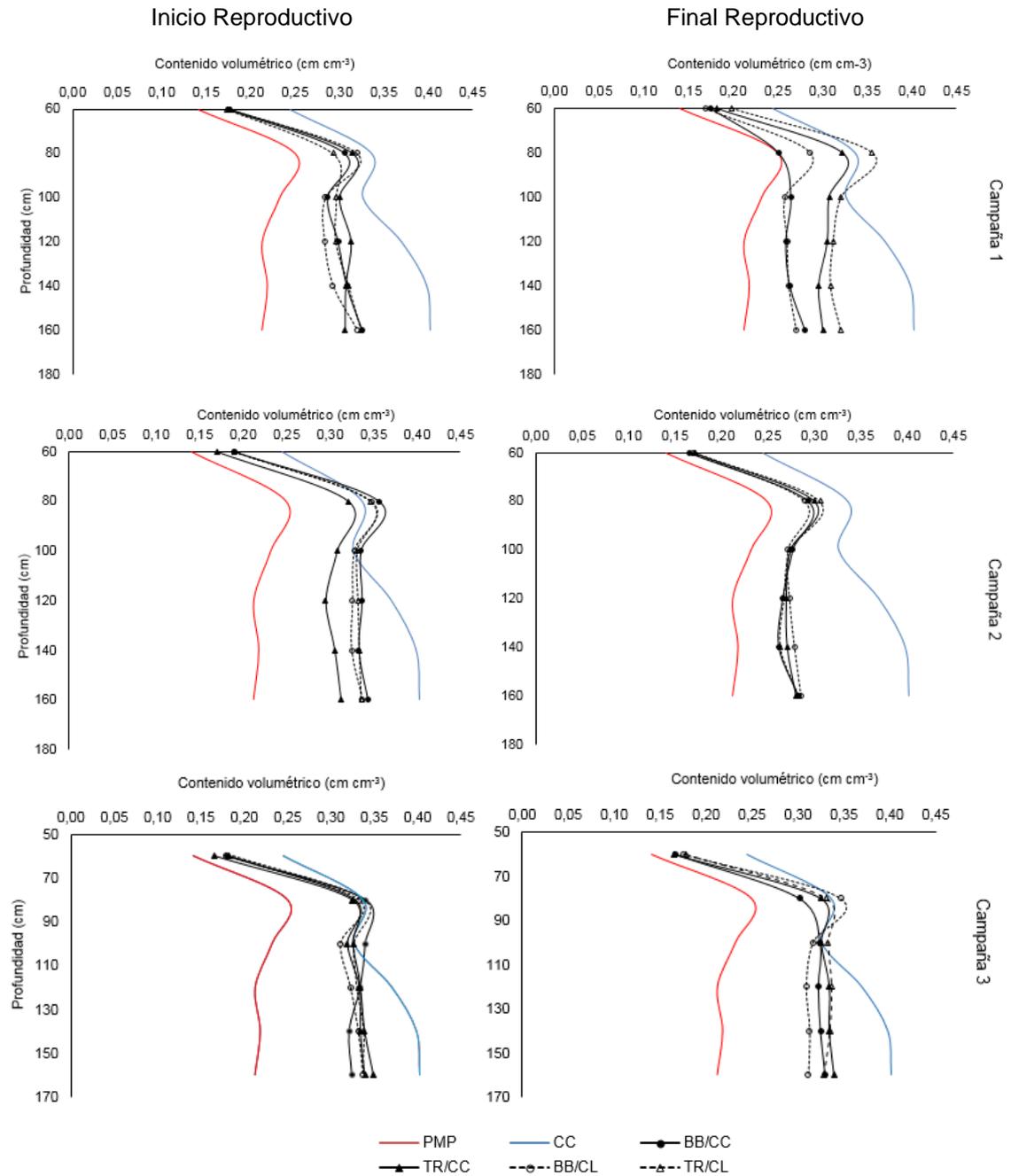
**Figura 2.3. a, c) y e)** Agua Total (AT, mm) en el perfil, a 1,6 m, en función de los días desde la siembra de soja (DDS). La dinámica del AT está delimitada por la capacidad de campo (CapC, línea azul) y el punto de marchitez permanente (PMP, línea roja) e indica el agua disponible para el cultivo. Flechas indican estado fenológico de R5 para soja ciclo corto (CC) y, ciclo largo (CL). Asteriscos indican diferencias entre tratamientos a lo largo de los DDS. **b), d) y e)** Balance hídrico para el ciclo de crecimiento de la soja, precipitación (PP) y evapotranspiración potencial (ETP) en mm 10 días<sup>-1</sup>. Flechas indican rango de período crítico los cultivares CC y CL.

**Tabla 2.5** Valores de p, según diferentes fuentes de variación, para la dinámica del agua total en el perfil a lo largo del crecimiento de la soja (en días desde la siembra, DDS). GM: grupo de madurez.

<b>Fuente variación</b>	<b>2013/4</b>	<b>2014/5</b>	<b>2016/7</b>
Antecesor*DDS	0,0002	0,0003	<0,0001
GM*DDS	0,055	ns	0,01
Antecesor*GM*DDS	ns	ns	ns

*Nota:* p>0,05 no significativo (ns)

Analizando la dinámica del agua en diferentes profundidades del suelo (Figura 2.4) no se encontraron variaciones de los tratamientos para los distintos estratos, a excepción de la Campaña 1. En este caso, al inicio del período reproductivo (R1), hubo interacción de los tratamientos según la profundidad edáfica (p=0,003, Tabla 2.6) mientras que, al final del ciclo (R7), se observó un efecto del antecesor. Las parcelas BB dejaron menor contenido de agua respecto a aquellas con trigo (p<0,0001). Estas diferencias se observaron por debajo de los 80 cm y revelan una mayor extracción de agua de la soja sobre BB (Figura 2.4.b).



**Figura 2.4.** Variación del contenido volumétrico de agua (cm cm<sup>-3</sup>) en profundidad para el inicio (R1, a la izquierda) y final de la fase reproductiva de la soja (R7, a la derecha).

**Tabla 2.6.** Valores de p para las diferentes fuentes de variación de los tratamientos en profundidad de suelo, para el inicio y final de la fase reproductiva de la soja. Ant: Antecesor, GM: grupo de madurez y Prof: profundidad del suelo

Fuente Variación	2013/4		2014/5		2016/7	
	Inicio R.	Final R.	Inicio R.	Final R.	Inicio R.	Final R.
Ant*Prof	0,002	<0,0001	ns	ns	ns	ns
GM*Prof	0,002	ns	ns	ns	ns	0,018
Ant*GM*Prof	0,003	ns	ns	ns	ns	ns

*Nota:* p>0,05 no significativo (ns). Inicio reproductivo (estado R1) y final reproductivo (estado R7).

### 2.3.4 Consumo de agua en soja

#### 2.3.4.1 Consumo total acumulado

Los consumos totales de agua en soja variaron en función de campaña, antecesor y GM. Si bien no hubo interacción entre estas dos últimas variables se determinaron diferencias significativas para el antecesor ( $p < 0,005$ ) y para el GM ( $p < 0,005$ ). Los consumos fueron de 40 a 80 mm superiores en los tratamientos BB (8 -13% más) y de 47 a 139 mm a favor del cultivar de CL, es decir, entre 7 a 32% extra (Tabla 2.7).

**Tabla 2.7.** Consumo de agua de soja (mm) para tratamientos con antecesor barbecho maíz (BB), trigo (TR), trigo + shelter (TRs), grupo de madurez (GM) de soja ciclo corto (CC) y ciclo largo (CL).

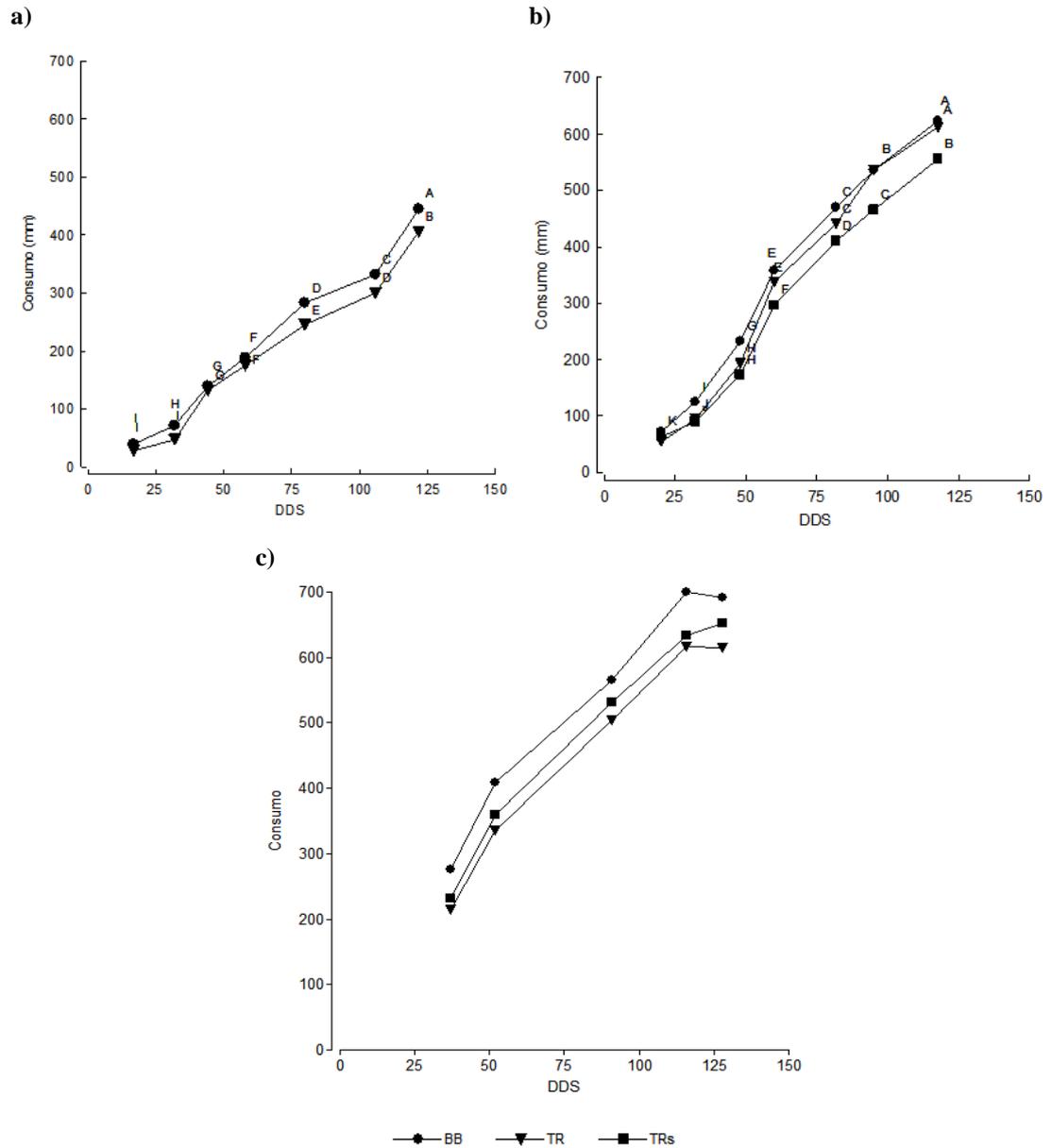
	2013/4			2014/5			2016/7		
	GM CC	GM CL	Promedio antecesor	GM CC	GMC L	Promedio antecesor	GM CC	GMC L	Promedio antecesor
<b>BB</b>	443	584	513 a	636	634	635 a	695	747	720 b
<b>TR</b>	404	543	473 b	585	674	630 a	619	654	637 a
<b>TRs</b>	-	-		540	597	569 b	627	677	651 a
<b>Promedio GM</b>	424 b	563 a		587 b	635 a		646 a	693 b	

*Nota:* Para un mismo año, letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos.

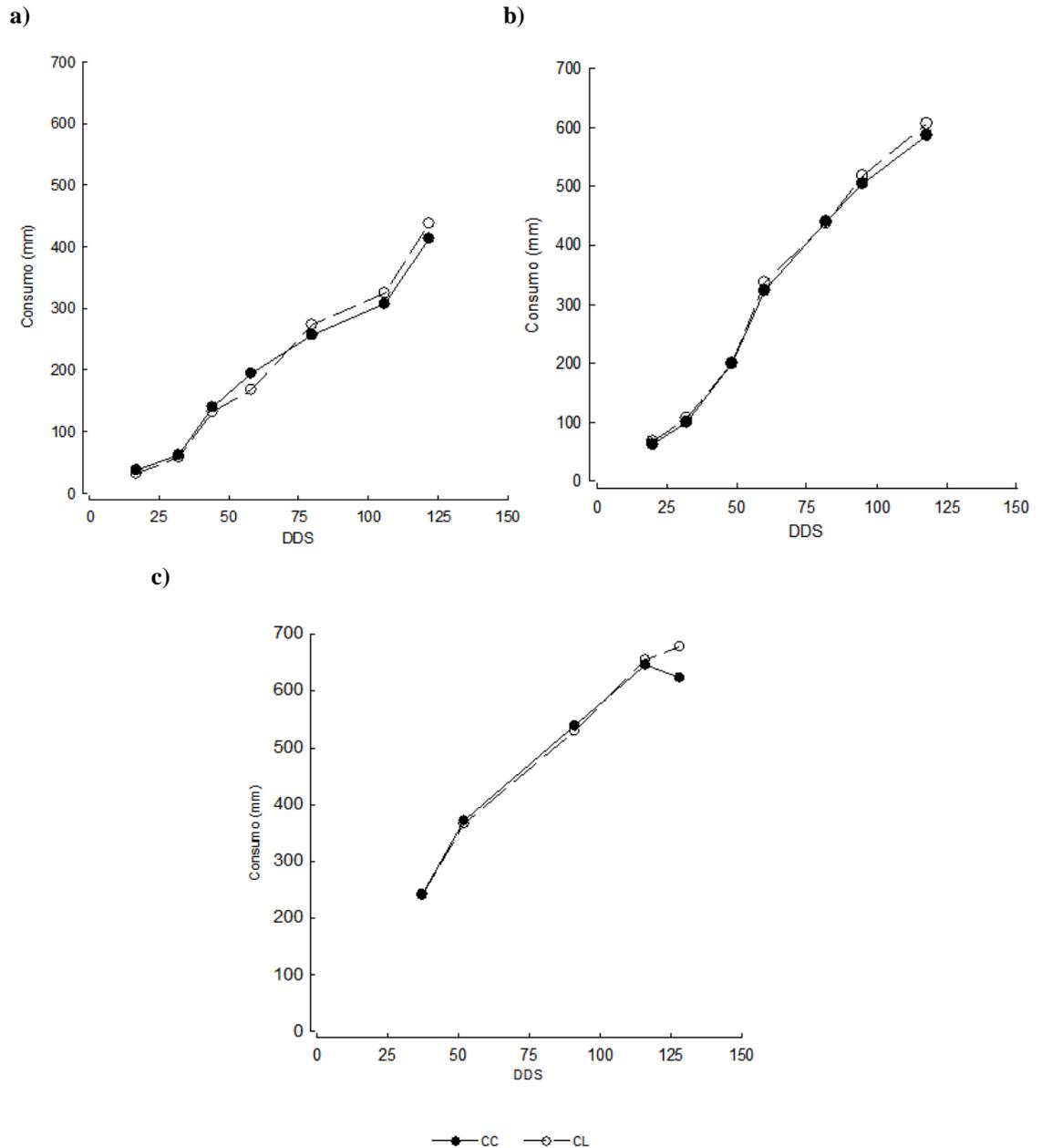
#### 2.3.4.2 Consumo acumulado en el tiempo

El ritmo con el que se consumió agua a lo largo del tiempo, a partir de la siembra, fue diferente según el antecesor (Figura 2.5). Para la 1° campaña, y luego de los 70 DDS, la soja sobre BB consumió más que aquella sobre TR ( $p=0,005$ , Figura 2.5.a). Para la 2° campaña, inicialmente, las soja sobre BB consumió más agua que aquella sobre TR y TRs; sin embargo, luego de los 70 DDS, no hubo diferencias de consumo entre BB y TR y, al finalizar el ciclo el consumo acumulado ambos superaron a TRs ( $p=0,0004$ , Figura 2.5.c).

Finalmente, en la Campaña 3, las diferencias de consumo durante el ciclo de la soja atribuibles a antecesor, fueron menos evidentes ( $p=0,055$ ), pero siempre a favor de un mayor consumo cuando la soja estuvo sobre BB (Figura 2.5.e).



**Figura 2.5.** Consumo acumulado en función de días desde la siembra (DDS) de soja para antecesor barbecho maíz (BB, círculos), trigo (TR, triángulos) y trigo + shelter (TRs, cuadrados). **a)** Campaña 2013/4, **b)** Campaña 2014/5, **c)** Campaña 2016/7. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos para una misma fecha.



**Figura 2.6.** Consumo acumulado para cultivar de soja ciclo corto (símbolos llenos) y ciclo largo (símbolos vacíos), en función de días desde la siembra (DDS). **a)** Campaña 2013/4, **b)** Campaña 2014/5, **c)** Campaña 2016/7. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos.

Analizando el conjunto de los años y tratamientos, el consumo estuvo asociado positivamente a las PP ( $r=0,84$ ,  $p<0,05$ ) y a la sumatoria ADi+PP ( $r=0,86$ ,  $p<0,05$ ). Por el contrario, el consumo no estuvo relacionado con el AD en suelo por sí sola ( $r=-0,02$ ,  $p=0,94$ ).

## 2.4 DISCUSIÓN

En un escenario de primavera húmeda como el de la Campaña 1 (Figura 2.1), la incorporación de trigo dentro de la secuencia anual no tuvo un impacto relevante sobre la disponibilidad de agua a la siembra de la soja. Aun cuando el contenido hídrico en ese momento fue menor al registrado durante la MF del trigo (como en las Campañas 1 y 2, Tabla 2.4), las lluvias posteriores permitieron mantener adecuadas condiciones de humedad. Esto concuerda con los resultados encontrados por Caviglia et al. (2008); en sus estudios donde evaluaron diferentes alternativas de cultivos cobertura (CdeC) como antecesores a soja de primera también observaron reducciones relativamente bajas en el contenido total de agua a la siembra (aproximadamente, 35 mm en 2006 y, 18 mm en 2007), respecto a una situación de barbecho. En una región semiárida de Córdoba, en estudios de uso de vicia y triticale como antecesores, se encontraron diferencias significativas en los perfiles al momento del secado químico que desaparecieron a la siembra de la soja (Pietrarelli et al., 2014). En este caso, entre el momento de secado del CdeC y la siembra, se produjo una precipitación acumulada de 170 mm que permitió la recarga del perfil. Por lo tanto, para éstos y otros estudios similares se manifiesta que la cantidad de agua disponible al momento de siembra de soja está en parte, relacionada con las precipitaciones en el momento de la recarga (Eiza et al., 2012). Es aquí la importancia de la eficiencia de barbecho (i.e la eficiencia con que el agua de las precipitaciones queda almacenada en el en el perfil de suelo, Quiroga et al., 1996), la cual puede no diferir entre tratamientos sin y con antecesor cuando el testigo está asociado a grandes pérdidas por evaporación, escurrimiento y/ drenaje en profundidad (Ridley, 2013).

En escenarios más secos como el que identificó a la 3° campaña, con una probabilidad de ocurrencia del 25% de los años (Figura 2.1.a), la presencia de un antecesor invernal sí podría implicar reducciones relevantes sobre el contenido de AD para la siembra. Sin embargo, aún en este caso, el impacto de esta reducción inicial no tuvo un efecto sostenido sobre el desecamiento del suelo (Figuras 2.3.a, c y e) ni sobre el consumo (Figura 2.5) durante parte del ciclo de la soja. No obstante, considerando que la variabilidad entre años en el contenido de agua a la siembra de la soja fue mayor cuando se incluyó el trigo que cuando se sembró luego de un barbecho, investigaciones futuras podrían analizar si existen escenarios productivos en los que el antecesor invernal tenga impactos más relevantes sobre el consumo de la soja.

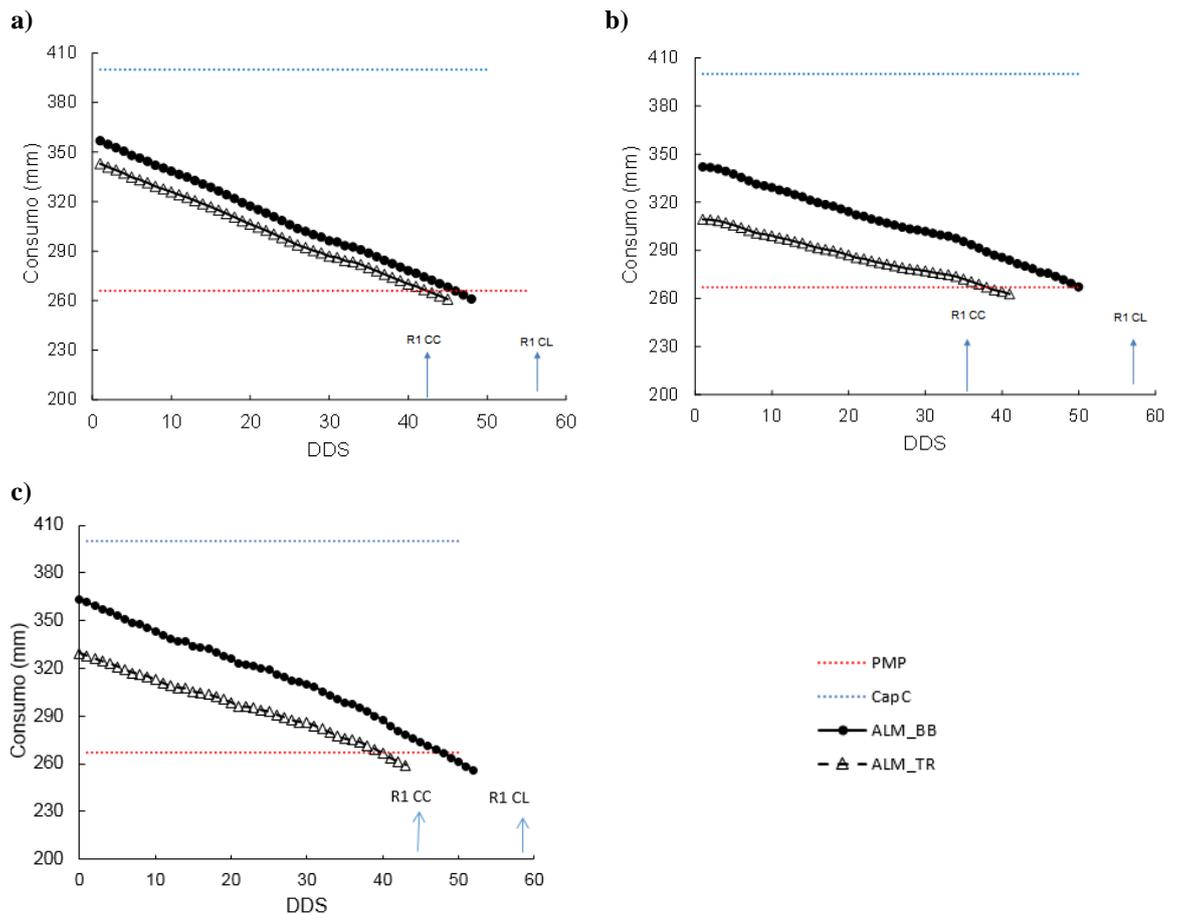
Los resultados encontrados en estas tres campañas indican que, aun cuando el trigo consumió entre 259 y 292 mm, las diferencias en contenido hídrico del suelo entre los tratamientos antecesores variaron sólo entre 50 y 90 mm. El régimen de lluvias de la zona durante el invierno, caracterizado por precipitaciones de bajo milimetraje, favorecería a que el agua en superficie de los barbechos se pierda por evaporación (Caviglia, 2007); mientras que con la presencia de cultivos antecesores, al menos de cobertura, no sólo se produce materia seca sino que también se incrementan las precipitaciones efectivas. Frente a esto, se abre el interrogante de qué podría pasar en un caso extremo en el que el cultivo de soja se hubiera abastecido sólo a partir del agua almacenada en el suelo.

En un hipotético escenario como ese, el ADi se habría agotado al inicio de la floración (R1) en caso de utilizar un CC sobre TR o TRs, o unos días después, sobre BB. Por el contrario, para el CL el ADi se habría agotado, durante el período vegetativo, o apenas iniciado R1 si el antecesor era BB (Figura 2.7) <sup>1</sup>. Para las tres campañas, el agua adicional almacenada durante BB permitió retrasar el PMP, sobre todo para las últimas, donde el retraso fue aproximadamente de 10 días.

El escenario supuesto, con 0 mm de lluvia acumulada durante diciembre, tendría una probabilidad de ocurrencia del 0% para la serie 2000-2017; aunque, precipitaciones menores a 50 mm tendrían una frecuencia de casi el 20% y la demanda atmosférica triplicaría fácilmente a esta oferta (ETP promedio diciembre 160 mm).

---

<sup>1</sup> El modelo utilizado BHOA (Fernández Long et al., 2012) permitió simular, hasta el metro de profundidad, los efectos de germinación, emergencia y estadios vegetativos iniciales del cultivo sobre el agua del suelo, en un supuesto escenario de ausencia de precipitaciones luego de la siembra.



**Figura 2.7.** Estimación de la dinámica del consumo del agua inicial a lo largo del ciclo de soja expresado en días desde la siembra, DDS) para **a)** Campaña 2013/4, **b)** Campaña 2014/5 y **c)** Campaña 2016/7. Círculos indican consumo a partir del agua almacenada en barbecho (ALM\_BB) y triángulos, en trigo (ALM\_TR). Flechas indican floración (R1) para ciclo corto (CC) y ciclo largo (CL). Líneas punteadas indican punto de marchitez permanente (PMP) y capacidad de campo (CapC) a 100 cm.

En general, para todo el ciclo del cultivo de soja, el agua almacenada en el perfil se mantuvo alrededor de los 500 mm (40% AU). Para la mayoría de las plantas cultivadas en diferentes ambientes, alrededor del 50% de agua útil en el suelo es el límite por debajo del cual éstas comienzan a manifestar síntomas de deficiencia hídrica (Sadras y Milroy, 1996). Por lo tanto, el óptimo crecimiento pudo verse afectado en situaciones como la fase de PC (principalmente del CC) de la Campaña 1 (80 DDS). Es destacable que, si bien el agua inicial, también estuvo en el orden de 40% AU, hubo una tendencia ascendente en las 2 o 3 mediciones inmediatas a la siembra. Esto refleja que el aporte de agua debido a las precipitaciones durante el primer mes de la siembra (Figura 2.3) fue mayor al consumo del cultivo en esa etapa (Figura 2.5).

El consumo de agua estimado para soja, para las tres campañas evaluadas, promedió los 591 mm, resultando similares a los obtenidos por Valenzuela et al. (2009) en Balcarce, 596,0 mm y por Totis de Zeljkovich et al. (1991; cit. Micucci et al., 2005) en

Pergamino, 583 mm. Otros datos para Entre Ríos, aunque sobre suelos vertisoles, reportan valores más bajos que los aquí estimados, 342 mm como promedio de dos campañas (Rodríguez, 2017).

Al principio del ciclo de la soja los tratamientos con trigo tuvieron menor contenido de agua en el perfil, aunque avanzada la fase vegetativa, se asimilaron al tratamiento BB (Figura 2.3). En las Campañas 1 y 3, hacia al final del ciclo, se evidenciaron nuevamente diferencias; aunque, en esta etapa los perfiles más secos resultaron los BB (entre -20 y -40 mm, Figura 2.3). Estas diferencias, que están en correlación con el mayor consumo de agua que se estimó en los cultivos de soja con BB (Figura 2.5), se manifestaron en los horizontes más profundos durante el período reproductivo (Figura 2.4). Los resultados sugieren la existencia de efectos del contenido de agua inicial que se manifestaron tardíamente, asociados, probablemente, al crecimiento y profundización de las raíces que permitió un mayor suministro de agua durante las etapas posteriores a la floración. El impacto de estos efectos sobre el crecimiento y el rendimiento del cultivo se analizarán en el próximo capítulo.

**CAPITULO 3:**  
**CRECIMIENTO, RENDIMIENTO Y EFICIENCIA DE USO**  
**DE LOS RECURSOS**

### 3.1 INTRODUCCIÓN

#### 3.1.1 Determinantes del rendimiento de los cultivos

El rendimiento potencial es aquel que, para cada especie, se obtiene en un ambiente dado en ausencia de estreses abióticos y bióticos. Bajo estas condiciones, el rendimiento depende de la cantidad de radiación que el cultivo sea capaz de interceptar y su eficiencia para convertirlo en biomasa (Otegui, 2015). En este contexto, el rendimiento de un cultivo de grano puede ser explicado como el producto entre biomasa total y el índice de cosecha (IC):

$$\text{Rendimiento (kg ha}^{-1}\text{)} = \text{Biomasa (kg ha}^{-1}\text{)} * \text{IC}$$

La biomasa a su vez es el resultado de la intercepción y utilización de la radiación solar incidente sobre el cultivo, durante su ciclo ontogénico (Andrade y Ferreiro, 1996). La radiación solar fotosintéticamente activa (RFA) interceptada por los cultivos es transformada en biomasa, de forma que la pendiente de la relación lineal entre ambas variables representa la eficiencia en el uso de la radiación (EUR, Sinclair y Muchow, 1999).

La EUR es afectada por diversos factores ambientales, siendo la temperatura uno de los principales, puesto que condiciona la cantidad de radiación que es interceptada por el cultivo a partir de su efecto sobre la tasa de desarrollo (Andrade, 1995; Muchow et al., 1990; Stockle y Kemanian, 2009). También se destaca el contenido hídrico del suelo: en presencia de déficits hídricos se reduce la expansión de hojas y la fotosíntesis foliar, y, por consiguiente, se limita el crecimiento (Sinclair y Muchow, 1999; Williams y Boote, 1995). Sin embargo, no siempre un estrés hídrico repercute en menor EUR. Ciertas variedades o cultivos tienen la capacidad de mantener altas tasas de intercambio de dióxido de carbono y de esta manera, tener mayor EUR (Collino et al., 2001).

En soja, la relación entre la RFAi y la biomasa generada es relativamente lineal hasta lograda la madurez (Sinclair y de Wit, 1975), aunque se han informado variaciones asociadas a la ontogenia (Confalone et al., 2016; Souza, 2009). Los valores alcanzados de EUR en soja son bajos, en comparación con otras especies C3, debido al alto contenido energético de las semillas y a los elevados requerimientos de nitrógeno en las hojas (Sinclair y Muchow, 1999); se han reportado valores promedios para especies C3 de 1,4-1,5 g MJ<sup>-1</sup> mientras que, en soja valores máximos alcanzan 1,02 g MJ<sup>-1</sup> (Sinclair y Muchow, 1999).

Algunos autores sugieren que la EUR puede variar según la longitud de ciclo. En sus estudios, de Wit (1967), determinó que los grupos de madurez (GM) mayores, poseen mayores potenciales de producción, cuando la radiación recibida y las temperaturas son las adecuadas para el crecimiento de la planta. Sin embargo, Egli (1993), analizando diferentes GM del 00 a V determinó que, cuando todos los cultivares interceptaron 95% RFA poco después de R1, no difirieron en la tasa de crecimiento del cultivo. Por lo tanto, un período de crecimiento vegetativo más largo de los cultivares de maduración más tardía no proporciona un rendimiento potencial más alto, en tanto que los cultivares de ciclo más corto pueden tener un potencial de rendimiento igual a los de mayor ciclo si se los expone a un ambiente similar (Egli, 1993).

### **3.1.2 Limitaciones hídricas al rendimiento**

En los cultivos de verano las mayores disminuciones en el rendimiento se producen cuando los déficits hídricos ocurren en la floración (Andrade y Sadras, 2000) y en etapas posteriores (Karam et al., 2005). Debido a ello, las variaciones en el rendimiento están explicadas en gran parte por las lluvias y temperaturas hacia fines de primavera y durante el verano (Bert y Satorre, 2013).

Particularmente, la producción en soja muestra gran dependencia de la disponibilidad hídrica durante el período comprendido entre la generación de vainas y el llenado de granos (Schou et al., 1978; Karam, 2005; Torrión et al., 2014). Esto es así porque durante estas etapas ocurre el crecimiento de los órganos reproductivos; por lo tanto, cuando se resiente el crecimiento del cultivo en esta etapa hay un efecto directo sobre la supervivencia y crecimiento de vainas y semillas.

La biomasa producida por unidad de agua consumida expresa la eficiencia con la cual el cultivo fija carbono en relación con el agua que pierde, y a esta relación se la define como eficiencia en el uso del agua (EUA, Dardanelli et al., 2008). En soja, valores de referencia de EUA para grano son de 9,1 kg.ha<sup>-1</sup>mm<sup>-1</sup>, según valores medidos en Balcarce por Della Maggiora et al. (2000) y de 6,4 kg.ha<sup>-1</sup>mm<sup>-1</sup>, según resultados de Rodríguez et al. (2011) en vertisoles de Entre Ríos.

La elección de cultivares es una estrategia para mejorar la EUA debido a su variabilidad intraespecífica (Prieto, 2011); experiencias de este tipo han sido demostradas también para maní (Collino et al., 2001) y para sorgo (Narayanan et al., 2013). En soja, los diferentes GM también podrían incidir, indirectamente, sobre

cambios en la EUA, considerando que difieren según el alcance de extracción de agua de las raíces y la generación de biomasa aérea (Dardanelli et al., 2008).

### **3.1.3 Eficiencia en el uso de los recursos según el sistema productivo**

La optimización de la productividad de los recursos es importante para el desarrollo de sistemas agrícolas sustentables. Un único cultivo al año utiliza solo una pequeña proporción de los recursos potencialmente disponibles (Andrade et al., 2015). Los cálculos basados en mediciones para la región Pampeana (Abbate et al., 1995; Valentinuz, 1996; Della-Maggiara et al., 2000) indican que (i) los cultivos individuales de trigo, maíz y soja pueden capturar 50-60% de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) durante la temporada de cultivo, pero solo el 20-36% de la RFA anual incidente y (ii) la evapotranspiración potencial de cultivos individuales varía de 400 a 600 mm / estación, lo que representa el 44-71% de la precipitación anual.

Con la práctica de doble cultivos como trigo/algodón, Du et al. (2015) obtuvieron variaciones de EUR de 100 a 140% con respecto a algodón en monocultivo, dependiendo del año de evaluación y del cultivar de algodón adoptado. Para la región Pampeana, Caviglia y Andrade (2010) estimaron que la captura de precipitación es, aproximadamente, 20% mayor en la secuencia trigo/soja respecto a soja como único cultivo anual. De modo similar, en la región subhúmeda de China se practica la secuencia trigo/maíz con el fin de aprovechar el balance de agua positivo del cultivo estival y establecer una reserva para el trigo del año siguiente. De esta manera, para la campaña agronómica, se logran eficiencias del uso de las precipitaciones del 96% (Zixi et al., 1994).

Si bien en secuencias de doble cultivos se logra mejorar la captura y uso total de recursos, no está bien documentado de qué manera el cultivo predecesor puede comprometer la disponibilidad y uso de agua del cultivo siguiente. Muchas veces, como el cultivo estival es sembrado fuera de su fecha óptima, parte de los menores rendimientos que suelen acompañarlo en dobles cultivos es, ante todo, un resultado de este retraso. Sin embargo, en regiones como Paraná, la fecha de siembra de soja luego de un trigo no compromete su rendimiento (Peltzer, 2007). Por lo tanto, resulta clave entender cómo se afecta la disponibilidad y uso de agua en estos sistemas.

En el capítulo anterior se describió cómo la presencia de un trigo puede reducir el contenido de agua disponible a la siembra de la soja y condicionar el consumo de agua

durante el ciclo. En este capítulo se evalúa si estos efectos, aunque de escasa magnitud, ocasionan reducciones en el crecimiento y rendimiento de los cultivos de soja. Para ello, se evaluará la productividad, la captura de recursos y la eficiencia en su uso de los mismos en los experimentos detallados en el Capítulo 2.

## 3.2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.2.1 Biomasa, rendimiento e índice de cosecha

Para trigo se tomaron muestras de rendimiento hacia madurez de cosecha, sobre 1m<sup>2</sup>, en el centro de la parcela. Los valores de rendimiento se corrigieron por humedad al 14%.

En soja, se determinó la biomasa aérea en las etapas de R1, R5 y R7 para Campaña 1 y R3, R5, R7 para Campañas 2 y 3; también se muestreó una superficie de 1m<sup>2</sup> ubicada en el centro de cada parcela. Las muestras fueron colocadas en estufa de ventilación forzada a 70 °C, hasta peso constante.

En el estadio de R8 se cosecharon 2 surcos centrales a lo largo de la parcela y a partir de éstas muestras se determinó rendimiento, humedad y peso promedio de 1000 granos. El rendimiento se ajustó a un 13,5 % de humedad y también, se calculó el índice de cosecha (IC) como el cociente entre el rendimiento de grano y la biomasa aérea total producida en el estado fenológico de R7.

### 3.2.2 Intercepción de la radiación

Para estimar la radiación solar incidente sobre el cultivo ( $R_i$ , MJ m<sup>-2</sup>) se consideraron los datos de radiación global, registrados por la estación meteorológica de la EEA Paraná, y se los multiplicó por un factor de 0,48 (Birch et al., 1999). La sumatoria diaria de  $R_i$ , afectada por la eficiencia de intercepción del cultivo ( $e_i$ ), permitió obtener la radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo ( $RFA_i$ , Gallo & Daughtry, 1986) para un período determinado.

$$RFA_i = \sum R_i \times e_i \quad (9)$$

La  $e_i$  se determinó mediante el empleo de un sensor lineal cuántico (Ceptómetro BAR-RAD DUAL, Cavadevices®). De acuerdo a la técnica de Gallo y Doughtry (1986), colocando el sensor por encima del cultivo se tuvo la radiación incidente ( $I_o$ ) y posicionado por debajo del dosel, en diagonal a los entre surcos se obtuvo la radiación transmitida ( $I_t$ ).

$$ei = (I_0 - I_t) / I_0 \quad (10)$$

Las mediciones de  $I_0$  e  $I_t$ , para ambos cultivares, fueron registradas a partir del momento de la floración (R1) del cultivar de CC, continuándose con una periodicidad de 10 días. Por cada parcela se tomaron tres lecturas, en días totalmente despejados y en horas de máxima radiación (11.30 - 14:00). La  $ei$  diaria entre observaciones se obtuvo por interpolación lineal.

### 3.2.3 Eficiencia en el uso de la radiación (EUR)

La EUR ( $\text{g MJ}^{-1}$ , Kiniry *et al.*, 1989; Sinclair & Muchow, 1999) se calculó como la relación entre la biomasa producida ( $B$ , en  $\text{gMS.m}^{-2}$ ) y la RFAi ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) durante un período determinado (Ec. 11).

$$EUR = B / RFAi \quad (11)$$

### 3.2.4 Eficiencia en el Uso de Agua (EUA)

La EUA ( $\text{kg.mm}^{-1}$ ) se estimó en términos para producción de biomasa ( $EUA_B$ ) y de rendimiento ( $EUA_R$ ) considerando la relación entre la biomasa ( $B$ ,  $\text{g m}^{-2}$ ) o el rendimiento en grano ( $R$ , en  $\text{g m}^{-2}$ ), según corresponda, y el consumo ( $\text{mm}$ , Ec. 6) acumulado durante el ciclo.

$$EUA_B = B / \text{Consumo} \quad \text{ó,} \quad EUA_R = R / \text{Consumo} \quad (12)$$

### 3.2.5 Aprovechamiento de las precipitaciones

A partir de registros pluviométricos se estableció la relación entre las precipitaciones acumuladas durante el ciclo de el/los cultivos (desde el inicio al final del ciclo de cada uno y variando según el cultivar de soja) y el total anual para la campaña en consideración (Tabla 2.2). Se compararon las combinaciones de soja como único cultivo anual y soja en doble cultivo con trigo como antecesor.

### 3.2.6 Análisis estadístico

La  $ei$  de cada tratamiento a lo largo del ciclo, se expresó en términos de DDS, para así comparar iguales fechas mediante el test de medidas repetidas en el tiempo.

Los datos de biomasa, rendimiento, RFAi, EUR y EUA fueron analizados mediante un análisis de la varianza (ANOVA) con el paquete Infostat (Di Rienzo et al., 2017). La comparación de medias entre tratamientos fue mediante el test de Duncan, con un error del 5%. Cuando los resultados analizados presentaron heterocedasticidad el ANOVA se realizó mediante modelos mixtos para corregir esta condición y disminuir el error. En este caso se utilizó DGC (Prueba de Di Rienzo, Guzmán y Casanoves (DGC) para comparar medias.

### **3.3 RESULTADOS**

#### **3.3.1 Biomasa, rendimiento e índice de cosecha**

##### *3.3.1.1 Rendimiento del trigo*

Los rendimientos obtenidos en trigo fueron de 2725 kg/ha para la Campaña 1, de 2001 kg/ha para la 2° y 3575 kg/ha para la 3°. En comparación con los valores promedios del departamento Paraná, para iguales períodos, los resultados primeros superaron ligeramente a la media departamental (+225 kg/ha), en tanto que los segundos se ubicaron por debajo (-100 kg/ha) y los terceros, superaron en 475 kg/ha (Bolsacer, 2017).

##### *3.3.1.2 Biomasa, rendimiento e índice de cosecha de la soja*

En soja, las diferencias para biomasa en los diferentes estadios fenológicos estuvieron determinadas por el GM y no por el antecesor; el cultivar de CL acumuló más biomasa que el de CC (Tabla 3.1), sobre todo durante la última campaña donde hubo producciones con diferencias de +2000 kg/ha en R7.

El efecto de la interacción antecesor/grupo de madurez, sólo fue reconocible en la Campaña 1, a nivel de biomasa acumulada en R7: el CC sobre TR fue el que menos biomasa final acumuló, luego le siguió TR/CL y las mayores producciones fueron para BB/CC y BB/CL.

**Tabla 3.1.** Biomasa del cultivo de soja ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) en estados de R1, R3, R5 y R7 para dos grupos de madurez (GM), sembrados sobre diferentes antecesores, en Paraná, ER. Promedios y resultados del ANOVA para tres campañas.

		Biomasa ( $\text{kg ha}^{-1}$ )								
		2013/4			2014/5			2016/7		
Antecesor	GM	R1	R5	R7	R3	R5	R7	R3	R5	R7
BB	CC	820	4122	7804 c	3544	7660	7308	2527	5581	7398
	CL	2402	5247	7965 c	4648	6667	8212	3376	9135	10469
TR	CC	970	4759	6134 a	3328	4840	7981	1896	5096	7110
	CL	3116	6671	6434 b	4070	5930	7698	3380	8528	8597
TRs	CC	-	-	-	2527	6507	8761	1134	4004	6068
	CL	-	-	-	3878	7821	9007	2905	8303	8077
BB		1611	4685	7885	4096	7164	7760	2952	7358	8934
TR		2043	5715	6284	3699	5385	7840	2638	6812	7854
TRs		-	-	-	3203	7164	8884	2020	6154	7073
	CC	895	4441	6969	3133	6336	8017	1852	4894	6859
	CL	2759	5959	7200	4199	6806	8306	3220	8655	9047
Ant		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
GM		0,0002	0,007	0,0003	0,008	ns	ns	0,002	0,0004	0,0008
Ant*GM		ns	ns	0,01	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Coef. Var. (%)		13,7	10,0	0,7	16	19,7	12,0	18,0	12,7	7,4

*Nota:* BB, Tr y TRs indican antecesores barbecho, trigo y trigo+shelter, respectivamente. CC y CL son los GM ciclo corto y largo, respectivamente. Ant: antecesor

Letras distintas indican diferencias significativas,  $p < 0,05$ .

ns: no significativo,  $p > 0,05$ .

En general, los valores promedios de rendimiento variaron entre 3200 y 3500  $\text{kg/ha}$ . En la Campaña 3 es donde se observaron los valores más bajos de producción; resultados promedios próximos a 2600  $\text{kg ha}^{-1}$  estuvieron asociados a los tratamientos con antecesor trigo (tanto TR como TRs) y promedios de 2500  $\text{kg ha}^{-1}$  relacionados al GM CC. Además, se destaca una leve tendencia de interacción entre el antecesor y el GM ( $p=0,054$ ). Para las Campañas 1 y 2, aunque hubo diferencias productivamente relevantes ( $\sim 750 \text{ kg/ha}$ ), estadísticamente no se encontró efecto de los tratamientos y/o sus interacciones (Tabla 3.2).

Considerando al año como efecto aleatorio (análisis de modelos mixtos, datos no mostrados) las interacciones de los tratamientos se mantuvieron como no significativas y, en cambio, antecesor y GM si lo fueron ( $p=0,02$  y  $p=0,03$ , respectivamente). Las diferencias serían de 520  $\text{kg ha}^{-1}$  a favor del tratamiento BB y de 450  $\text{kg ha}^{-1}$  a favor del GM CL.

**Tabla 3.2.** Rendimiento ajustado a humedad 13,5% ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), peso de mil granos (P1000, g) y número de granos ( $\text{N}^\circ \text{gr m}^{-2}$ ) para dos grupos de madurez (GM), sembrados sobre diferentes antecesores, en Paraná, ER. Promedios y resultados de modelos mixtos para tres campañas.

Ant	GM	2013/4			2014/5			2016/7		
		Rto (kg/ha)	P1000 (g)	N <sup>o</sup> Gr/m <sup>2</sup>	Rto (kg/ha)	P1000 (g)	N <sup>o</sup> Gr/m <sup>2</sup>	Rto (kg/ha)	P1000 (g)	N <sup>o</sup> Gr/m <sup>2</sup>
BB	CC	3605	178	1727	3249	178	1913	3111	185	1686
	CL	3712	161	1314	2891	169	2052	3750	188	1991
TR	CC	3430	169	1831	2770	177	1560	2375	181	1315
	CL	3190	161	1387	3526	181	2081	2817	163	1726
TRs	CC	-	-	-	3182	178	1638	1850	183	1014
	CL	-	-	-	3327	186	1943	3462	173	1999
BB		3659	170	1520	3070	174	1983	3430 <sup>b</sup>	186	1838
TR		3310	165	1609	3148	179	1821	2596 <sup>a</sup>	172	1520
TRs		-			3255	176	1791	2656 <sup>a</sup>	177	1605
	CC	3516	173	1779 <sup>b</sup>	3067	178	1704 <sup>a</sup>	2445 <sup>a</sup>	183	1379 <sup>a</sup>
	CL	3451	161	1350 <sup>a</sup>	3248	174	2026 <sup>b</sup>	3343 <sup>b</sup>	175	1905 <sup>b</sup>
Ant		ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,007	ns	ns
GM		ns	ns	0,01	ns	ns	0,01	0,001	ns	0,003
Ant*GM		ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,054	ns	ns
Coef. Var. (%)		9,6	4,9	6,5	15,4	5,9	8,1	15,5	6,5	11,4

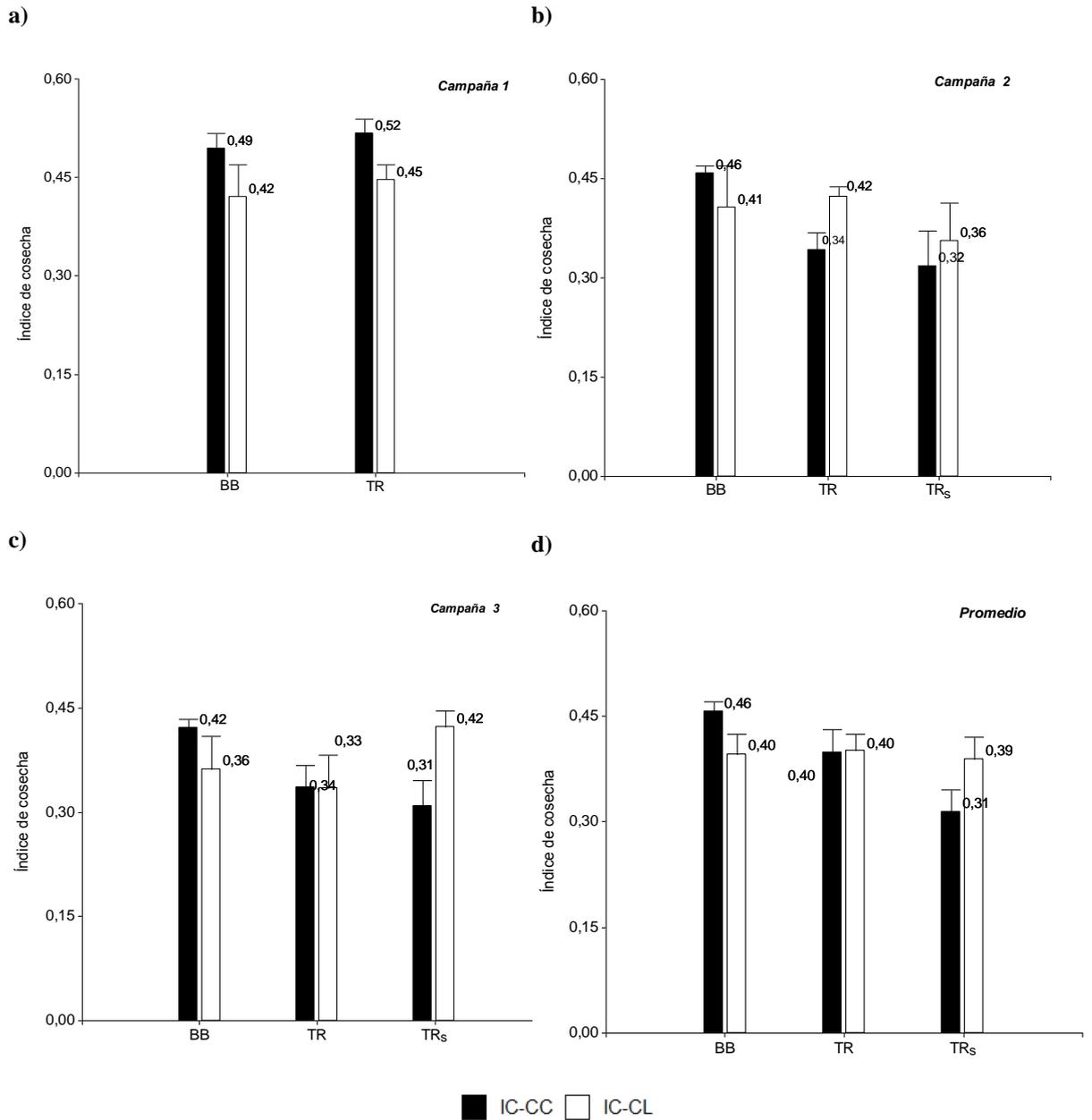
*Nota:* BB, Tr y TRs indican antecesores barbecho, trigo y trigo+ shelter, respectivamente. CC y CL son los GM ciclo corto y largo, respectivamente. Para la Campaña 2013/4 los datos de P1000 y N<sup>o</sup> granos fueron independientes al muestreo de rendimiento.

Letras distintas indican diferencias significativas,  $p < 0,05$ .

ns: no significativo,  $p > 0,05$ .

En relación a los componentes de rendimiento (Tabla 3.2), el P1000 no presentó variación según los tratamientos ( $p > 0,05$ ) mientras que, el N<sup>o</sup> granos fue variable de acuerdo al GM ( $p < 0,05$ ).

Los mayores IC se dieron en la primer campaña y, considerando los promedios de los tres períodos evaluados no hubo diferencias significativas entre los GM ( $p = 0,9$ ) y sí a nivel de antecesor ( $p = 0,04$ ). Para BB fue de 0,43, TR 0,40 y TRs 0,35 (Figura 3.1).



**Figura 3.1.** Índice de cosecha (IC) en soja para **a)** Campaña 2013/4, **b)** 2014/5 y **c)** 2016/7, y **d)** promedio de los tres períodos. Barras negras representan ciclo corto (CC) y barras blancas ciclo largo (CL).

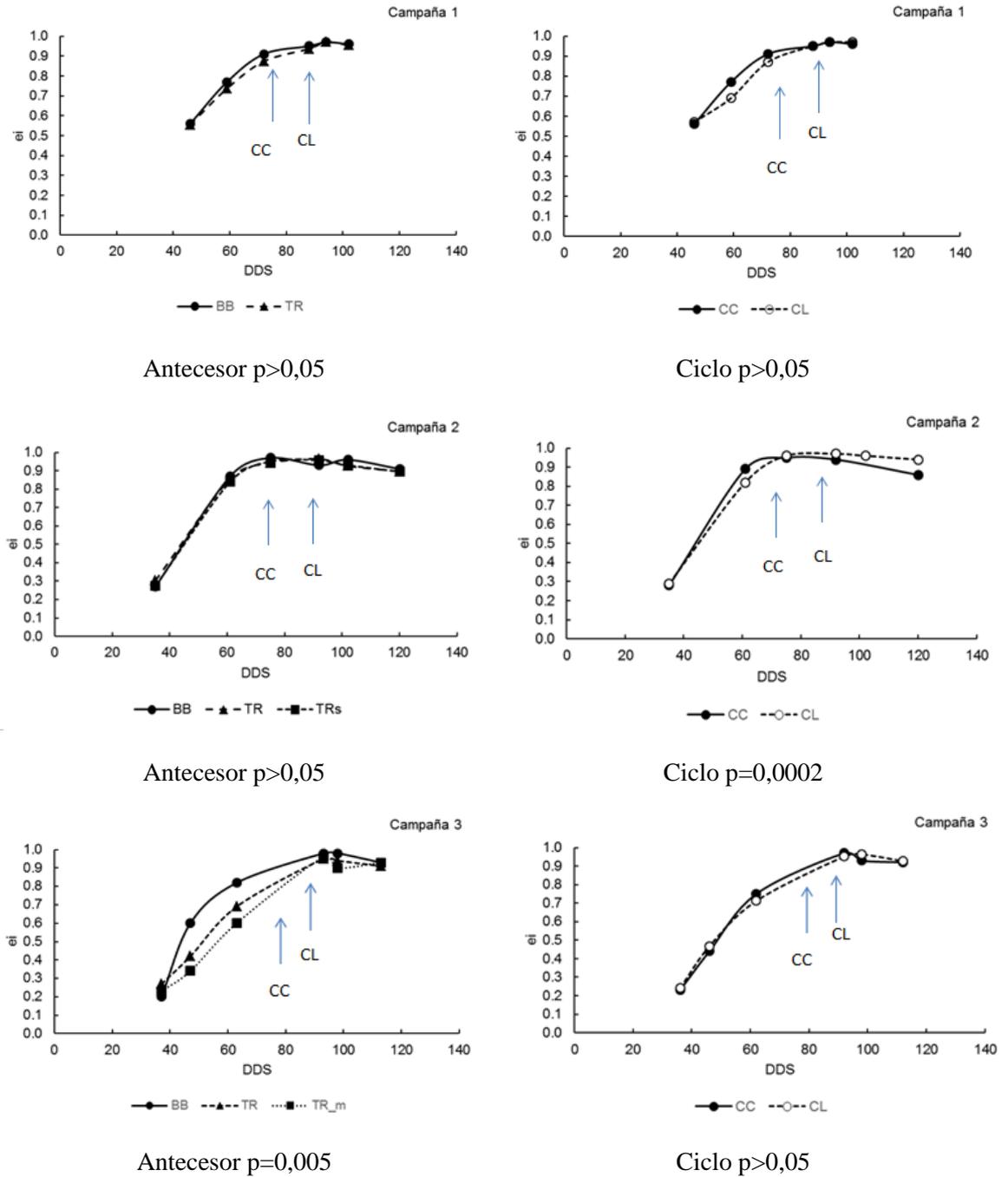
### 3.3.2 Radiación interceptada

En relación a la oferta de recursos durante los meses en que el cultivo estuvo implantado, las Campañas 1 y 2 exhibieron mayores valores diarios de Ri que la Campaña 3 (Tabla 3.3).

**Tabla 3.3.** Radiación solar incidente (Ri) mensual, MJ m<sup>-2</sup>, para Paraná.

<b>Ri diaria (MJ m<sup>-2</sup>)</b>					
<b>Campaña</b>	<b>Diciembre</b>	<b>Enero</b>	<b>Febrero</b>	<b>Marzo</b>	<b>Abril</b>
2013/4	409	379	247	278	199
2014/5	378	374	279	275	225
2016/7	343	331	258	252	201

La intercepción de la radiación ( $e_i$ ), se incrementó a partir de floración (R2) hasta los 80 DDS (fase fenológica R4/R5), alcanzando valores máximos de ~95% (Figura 3.2). En las dos primeras campañas no se observaron diferencias entre los tratamientos ni interacciones entre sí ( $p > 0,05$ ); en cambio, en la Campaña 3 los cultivos sembrados sobre antecesor trigo tuvieron menor eficiencia de intercepción durante las primeras etapas del desarrollo reproductivo ( $p = 0,005$ ), alcanzando más tardíamente la plena intercepción.



**Figura 3.2.** Eficiencia de intercepción ( $e_i$ ) expresada en días desde la siembra (DDS). A la izquierda: Círculos indican antecesor barbecho maíz (BB), triángulos indican antecesor trigo, condición hídrica normal (TR) y cuadrados, trigo + condición hídrica modificada a la siembra de soja (TRs). A la derecha: Símbolos llenos, ciclo corto de soja (CC) y vacíos, ciclo largo (CL).

La RFAi acumulada desde R1 a MF, no presentó diferencias significativas para los tratamientos evaluados, a excepción de la Campaña 2, donde las parcelas con antecesor BB lograron mayor intercepción que las provenientes de trigo ( $p=0,017$ , Tabla 3.4).

**Tabla 3.4.** Radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi), desde floración a madurez fisiológica, para dos grupos de madurez (GM) de soja, sembrados sobre diferentes antecesores, en Paraná, ER. Promedios y resultados del ANOVA para tres campañas.

		RFAi (MJ m <sup>-2</sup> )		
		2013/4	2014/5	2016/7
Antecesor	BB	780	697 <sup>b</sup>	531
	TR	666	647 <sup>a</sup>	501
	TRs	-	639 <sup>a</sup>	483
GM	CC	725	670	503
	CL	720	652	510
Ant		ns	0,026	ns
GM		ns	ns	ns
Ant*GM		ns	ns	ns

*Nota:* BB, Tr y TRs indican antecesores barbecho, trigo y trigo+shelter, respectivamente. CC y CL son los GM ciclo corto y largo, respectivamente. Ant: antecesor

Letras distintas indican diferencias significativas,  $p<0,05$ .

Ns: no significativo,  $p>0,05$ .

### 3.3.3 Eficiencia en el uso de la radiación

Para la EUR, tanto en términos de biomasa como de rendimiento, el patrón que más incidencia tuvo en las diferencias encontradas fue el GM. En general, el CC presentó menor eficiencia que el CL, con diferencias próximas al 20% tanto para EUR<sub>b</sub> y EUR<sub>r</sub>. Además, se observa que la mayor RFAi durante la Campaña 1 no fue eficientemente aprovechada para su conversión en biomasa o rendimiento, ya que presentó la menor EUR de los tres periodos analizados (Tabla 3.5).

El antecesor no tuvo incidencia en la Campaña 1 mientras que, en la 2° sólo a nivel de biomasa y, de rendimiento en la 3°.

**Tabla 3.5.** Eficiencia de uso de la radiación para biomasa (EUR<sub>b</sub>) y rendimiento (EUR<sub>r</sub>), expresada en g Mj<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>, para dos grupos de madurez (GM) de soja, sembrados sobre diferentes antecesores, en Paraná, ER. Promedios y resultados del ANOVA para tres campañas.

		2013/4		2014/5		2016/7	
Antecesor	GM	EUR <sub>b</sub>	EUR <sub>r</sub>	EUR <sub>b</sub>	EUR <sub>r</sub>	EUR <sub>b</sub>	EUR <sub>r</sub>
BB	CC	0,74	0,46	1,02	0,47 a	1,38	0,58
	CL	1,02	0,49	1,22	0,49 a	2,00	0,71
TR	CC	0,72	0,44	1,21	0,41 a	1,41	0,47
	CL	1,17	0,47	1,21	0,51 a	1,74	0,56
TRs	CC	-	-	1,39	0,44 a	1,37	0,41
	CL	-	-	2,08	0,73 b	1,60	0,67
Ant	BB	0,88	0,48	1,12 <sup>a</sup>	0,48	1,69	0,65 <sup>b</sup>
	TR	0,95	0,46	1,21 <sup>a</sup>	0,46	1,58	0,52 <sup>a</sup>
	TRs	-	-	1,74 <sup>b</sup>	0,59	1,49	0,54 <sup>a</sup>
GM	CC	0,73 <sup>a</sup>	0,45	1,20 <sup>a</sup>	0,44 <sup>a</sup>	1,38 <sup>a</sup>	0,49 <sup>a</sup>
	CL	0,95 <sup>b</sup>	0,48	1,50 <sup>b</sup>	0,57 <sup>b</sup>	1,78 <sup>b</sup>	0,65 <sup>b</sup>
Ant		ns	ns	0,01	ns	ns	0,04
GM		0,001	ns	0,002	0,004	0,009	0,005
Ant*GM		0,016	ns	ns	0,037	ns	ns

*Nota:* BB, Tr y TRs indican antecesores barbecho, trigo y trigo+shelter, respectivamente. CC y CL son los GM ciclo corto y largo, respectivamente. Ant: antecesor

Letras distintas indican diferencias significativas, p<0,05.

ns: no significativo, p>0,05.

### 3.3.1 Eficiencia en el uso del Agua

La Campaña 1 de evaluación se destacó por presentar los mayores valores tanto de  $EUA_b$  como de  $EUA_r$ . En general, las diferencias encontradas estuvieron asociadas al GM y no al antecesor. Aunque, en términos de rendimiento, no hubo una tendencia uniforme a favor de uno de los cultivares; para la Campaña 1, el GM de CC tuvo una eficiencia 25% superior al CL y, por el contrario, en la 3° se destaca una  $EUA_r$  20% menor del CC. Además, se observó una leve tendencia de interacción entre los tratamientos ( $p=0,054$ ), donde el CC sobre TRs tuvo la menor  $EUA_r$  (Tabla 3.6).

**Tabla 3.6.** Eficiencia en el uso del Agua para biomasa ( $EUA_b$ , kg mm<sup>-1</sup>) y rendimiento de soja ( $EUA_r$ , kg mm<sup>-1</sup>), para dos para dos grupos de madurez (GM) de soja, sembrados sobre diferentes antecesores, en Paraná, ER. Promedios y resultados de modelos mixtos para tres campañas.

		2013/4		2014/5		2016/7	
Antecesor	GM	$EUA_b$	$EUA_r$	$EUA_b$	$EUA_r$	$EUA_b$	$EUA_r$
BB	CC	13,1	8,2	14,6	5,3	10,6	4,5
	CL	13,7	6,5	11,5	5,3	14,0	5,0
TR	CC	13,9	8,5	12,9	4,6	11,5	3,9
	CL	15,0	6,0	11,9	4,9	13,2	4,3
TRs	CC	-	-	16,7	5,2	9,7	3,0
	CL	-	-	13,2	5,3	11,9	5,0
Ant	BB	13,4	14,7	13,1	5,3	12,3	4,8
	TR	14,5	14,5	12,4	4,8	12,4	4,1
	TRs	-	-	15,0	5,3	10,8	4,0
GM	CC	13,5	8,4 <sup>b</sup>	14,7 <sup>b</sup>	5,0	10,6 <sup>a</sup>	3,8 <sup>a</sup>
	CL	14,4	6,3 <sup>a</sup>	12,2 <sup>a</sup>	5,2	13,0 <sup>b</sup>	4,8 <sup>b</sup>
Ant		ns	ns	ns	ns	ns	ns
GM		ns	0,0005	0,037	ns	0,004	0,007
Ant*GM		ns	ns	ns	ns	ns	0,054

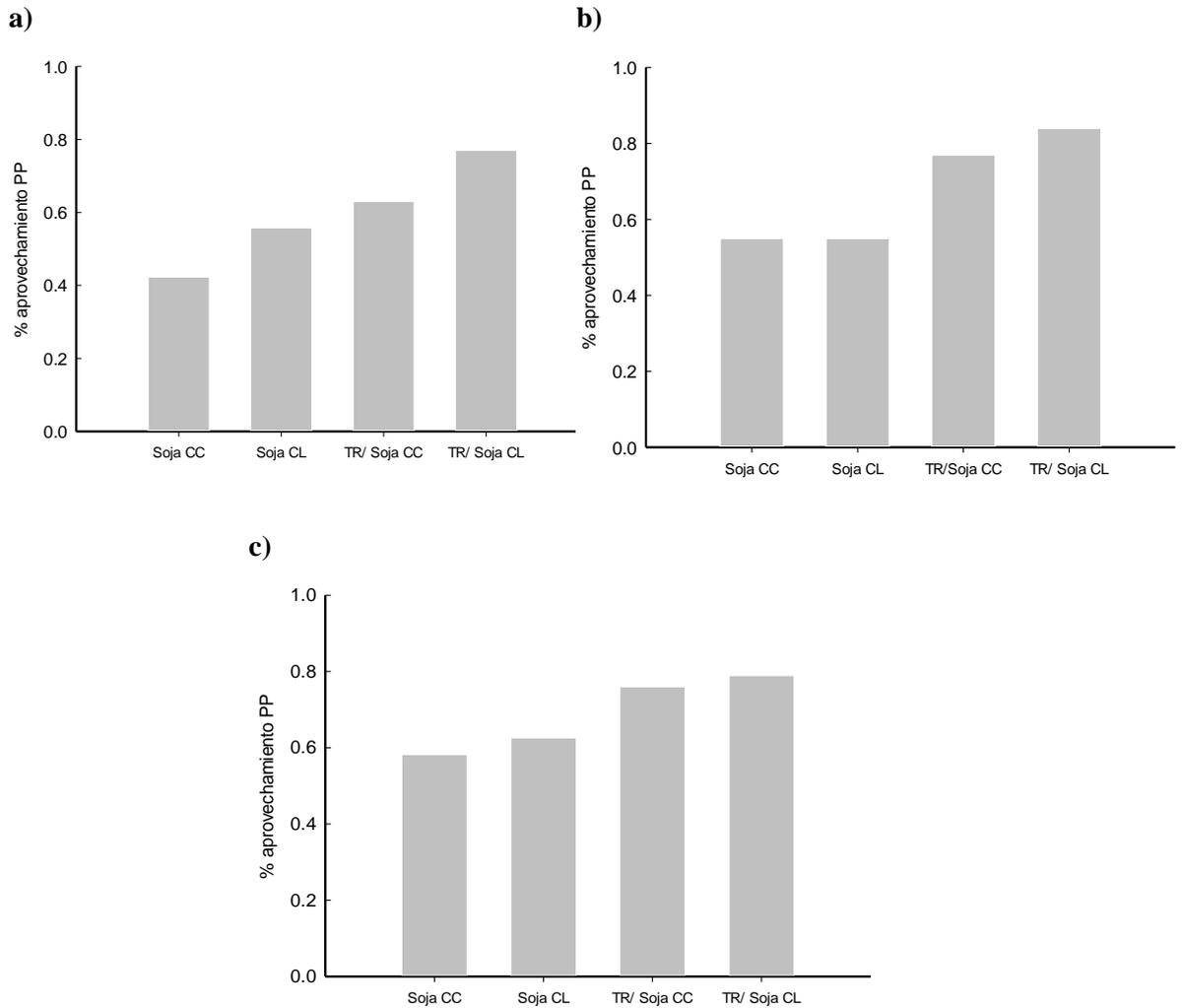
*Nota:* BB, Tr y TRs indican antecesores barbecho, trigo y trigo+shelter, CC y CL son los cultivares de soja de ciclo corto y largo, respectivamente. Ant: antecesor

Letras distintas indican diferencias significativas,  $p<0,05$ .

ns: no significativo,  $p>0,05$ .

### 3.3.2 Aprovechamiento de las precipitaciones

Respecto al aprovechamiento de las precipitaciones, la alternativa del doble cultivo logró valores de eficiencia 20% superiores con respecto a soja proveniente de barbecho maíz. Además, los tratamientos que incluyeron al GM más largo también presentaron ventaja respecto a aquellos con CC, en virtud de la longitud de ciclo (Figura 3.3). Esta tendencia fue más notable para las campañas más lluviosas, 2013/4 y 2014/5, donde el aprovechamiento de TR/CL fue 14% y 11% superior, respectivamente.

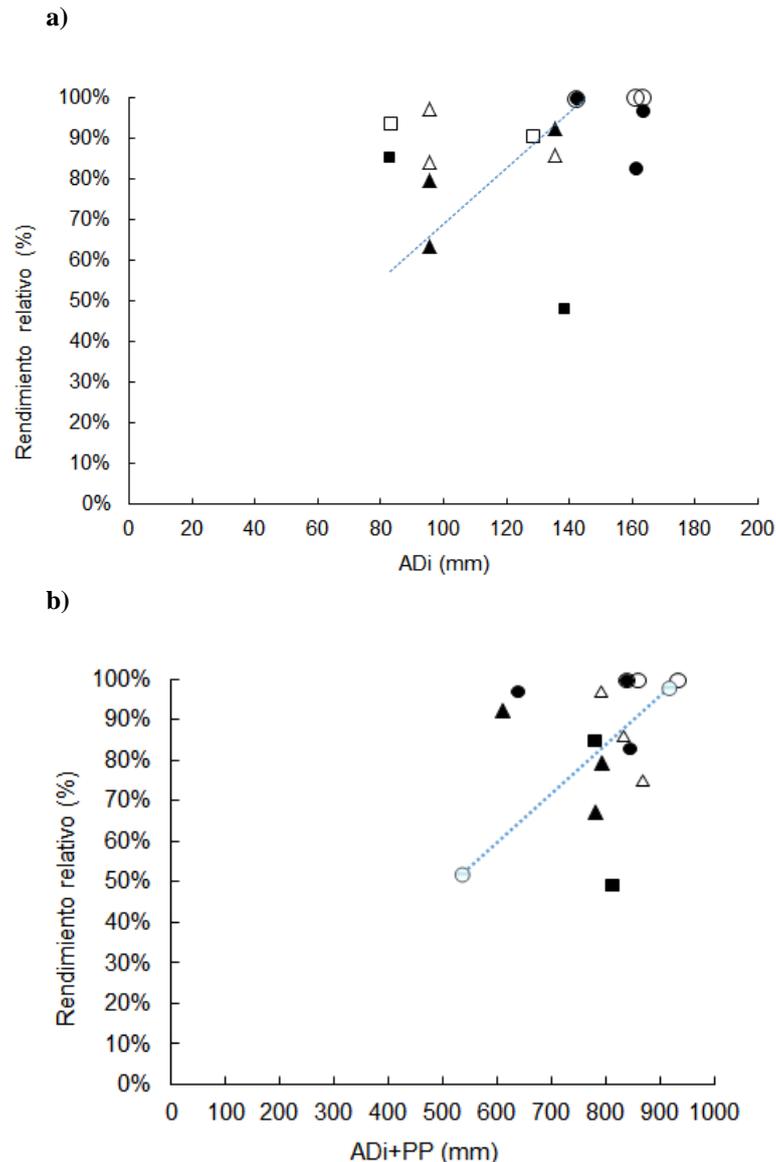


**Figura 3.3.** Aprovechamiento de las precipitaciones anuales (%) para monocultivo de soja ciclo corto (CC) y ciclo largo (CL), secuencia trigo/soja CC y trigo/soja CL. **a)** Campaña 2013/4, **b)** 2014/5 y **c)** 2016/7.

### 3.3.3 El rendimiento y el agua disponible inicial (ADi)

La relación entre el rendimiento y el ADi, a la siembra, no fue significativa ( $R^2=0,24$ ), incluso, eliminando un outlier de rendimiento de 1850 kg/ha (49% de rendimiento relativo). A pesar de que se observó una leve tendencia a aumentar la productividad con el mayor contenido de agua y que los tratamientos BB, que tuvieron mayor contenido de agua a la siembra y presentaron mayor rendimiento relativo<sup>2</sup> (círculos, Figura 3.4.a), se produjeron amplias variaciones del rendimiento. Esto, sobre todo, en los tratamientos con antecesor trigo (triángulos, Figura 3.4.a). Asimismo, la variación de los rendimientos ante diferente oferta de ADi fue mayor en variedades de CC ( $\sigma= 746$ ) que en CL ( $\sigma= 557$ ). La relación tampoco mejoró cuando la oferta se consideró en términos de ADi+ precipitaciones del ciclo ( $R^2$  negativo, Figura 3.4b).

<sup>2</sup> El rendimiento relativo fue estimado como la relación entre el rendimiento para un año "X" y el máximo para la campaña considerada.



**Figura 3.4.** a) Rendimiento relativo de soja en función del a) agua disponible a la siembra (ADi) y, b) del ADi más las precipitaciones del ciclo (ADi+PP). Antecesores barbecho maíz (círculos), trigo (triángulos) y trigo+ shelter (cuadrados). Símbolos llenos, ciclo corto y círculos vacíos, ciclo largo de soja. Línea de puntos indica relación 1:1.

### 3.4 DISCUSIÓN

La desigual fenología de los cultivares de soja evaluados fue la principal determinante de la mayor biomasa producida en el cultivar de CL. Sólo en la Campaña 1 existió una interacción significativa entre el antecesor y GM, siendo el crecimiento del CC menor luego de trigo (Tabla 3.1). De acuerdo a lo descrito en el Capítulo 2, la soja proveniente de barbecho de maíz registró un mayor consumo de agua hacia el final del ciclo (Figura 2.5.a); sin embargo, los rendimientos no difirieron entre antecesores. Esto indica que la oferta de agua, asociada a las precipitaciones hacia los 100 DDS (Figura 2.3.b), llegó tarde en términos de periodo de definición del rendimiento; también que la

recarga de los perfiles, en todos los tratamientos, permitió una captura similar de radiación en el período reproductivo (Figura 3.2) y una elevada fijación de granos durante el período crítico. De hecho, esta campaña tuvo un elevado IC y una elevada  $EUA_r$ , consistentes con un óptimo crecimiento en las etapas reproductivas (mayor biomasa en R7).

Los resultados de las Campañas 1 y 2 no coinciden plenamente con los encontrados por Andrade et al. (2015), quienes comparando diversos antecesores a soja obtuvieron mayor biomasa acumulada cuando el cultivo no tuvo antecesor invernal, sino que provenía de barbecho. Para los ambientes evaluados en esta tesis, las escasas deficiencias en el contenido inicial de agua y el hecho de que se trataran de campañas relativamente húmedas (precipitaciones durante el cultivo de soja mayores a la mediana, Figura 2.1) permiten suponer que, la presencia de un trigo como antecesor de la soja no tendría penalidad en el rendimiento del cultivo estival.

En contraste, para la Campaña 3 los mayores rendimientos se obtuvieron en los tratamientos BB. Cabe destacar que, en esta campaña, los cultivos sembrados luego de trigo partieron de un menor contenido de agua inicial (Capítulo 2, Figura 2.3) lo que se tradujo, posiblemente, en un menor crecimiento vegetativo. De hecho, fue evidente el retraso en la capacidad de captar radiación de los cultivos de soja sembrados sobre trigo (Figura 3.2); en este caso, los resultados coinciden con Andrade et al. (2015), quienes obtuvieron mayor  $ei$  en los tratamientos barbecho/soja con relación a soja con antecesores invernales.

La  $EUR_b$  presentó valores medios de  $1,28 \text{ g Mj}^{-1}$ ; para la Campaña 3 es donde se dieron algunos valores superiores a  $1,5 \text{ g Mj}^{-1}$  que se aproximan a los resultados hallados por Rodríguez (2017),  $1,54 \text{ g Mj}^{-1}$  (R3 a R7) en soja con provisión de riego en vertisoles del centro este de Entre Ríos y por Andrade (1995),  $1,74 \text{ g Mj}^{-1}$  en Balcarce. Las mayores EUR, tanto para biomasa como para rendimiento, se asociaron al GM VI. Faraldo et al. (2011) analizando diferentes ciclos de soja del III corto al V corto obtuvieron valores disimiles de EUR. Para la 5° campaña de análisis obtuvieron mayor eficiencia en los grupos más largos mientras que, en las campañas 2, 3 y 4 los resultados fueron similares y/o variaron de acuerdo a la fase fenológica. Por lo tanto, aun cuando la mayor EUR en el GM largo fue un resultado frecuente en esta tesis, la consistencia de esta respuesta debería estudiarse más a fondo.

Más allá de los efectos del antecesor sobre la dinámica del agua y del crecimiento del cultivo de soja, no se encontró una relación estrecha entre el rendimiento y el ADi. Sin embargo, algunas de las tendencias observadas sugieren que, si bien la reducción del agua inicial debida a la presencia de un antecesor invernal no comprometería *per se* los rendimientos de soja, podrían hacerlos más dependientes de las condiciones ambientales, particularmente en las variedades de CC. Por lo tanto, estos resultados sugieren que el abordaje de la relevancia del agua inicial para el cultivo de soja requiere un abordaje probabilístico, para determinar su efecto sobre la estabilidad de los rendimientos a mediano o largo plazo. Algunas de estas cuestiones se analizan en el capítulo siguiente.

En conjunto, estos resultados sugieren que a través de una correcta elección del GM (utilizando, por ejemplo, un ciclo más largo) no existirían penalidades importantes al rendimiento de soja cuando su siembra se realiza luego de un cultivo antecesor y, por lo tanto, el doble cultivo no sólo permite incrementar la productividad sino también el uso de los recursos disponibles. Dada la distribución de las precipitaciones en la región, la soja como único cultivo logra capturar aproximadamente entre el 40-60 % del agua caída durante una campaña, dependiendo del GM utilizado (Figura 3.3); la realización del doble cultivo elevaría sustancialmente esta captura. Datos locales, obtenidos en Paraná por Coll et al. (2007) y van Opstal et al. (2011) expresaron similares resultados para soja (55%) y, para la secuencia trigo/soja alcanzaron mayor captación que las registradas en las campañas aquí estudiadas (por encima del 90%). Por lo tanto, esta mayor captura, permitiría sumar al mayor rédito económico del doble cultivo, beneficios asociados a la menor percolación profunda, menor erosión y mejor control de malezas (Pinto et al., 2017; Taboada y Varela, 2014).

A partir de los diversos análisis desarrollados en éste capítulo, con énfasis en el crecimiento, captación y uso de los recursos, se observó que las variables como el rendimiento y la EUA no tuvieron mayores diferencias cuando se estudiaron en términos del antecesor, a excepción de la Campaña 3. Esta particularidad coincide con una distribución de las PP y balance hídrico del suelo menos favorable (Figura 2.3 e y f). En general, para los tres años evaluados, las diferencias estuvieron más asociadas al GM, siendo el CL el que denotó mayores EUA y EUR.

**CAPITULO 4:**  
**APLICACIÓN DE MODELO CROPGRO PARA**  
**EVALUAR LA IMPORTANCIA DEL AGUA DISPONIBLE**  
**INICIAL EN SOJA**

## 4.1 INTRODUCCIÓN

Los modelos de simulación se han utilizado para evaluar el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos, en función de la dinámica suelo-planta-atmosfera. Ayudan a determinar la mejor estrategia de manejo ante la prueba de varios escenarios ambientales; mediante el análisis comparativo de resultados reales versus simulados, permiten constatar la validez de los datos obtenidos en la experimentación a campo (Mercau et al., 2007; Rauff & Bello, 2015).

CROPGRO-Soybean (Boote, 1998) es uno de los modelos que integra DSSAT (Sistema de Soporte de Decisión para la Transferencia Agrotecnológica), en su paquete de software para facilitar la simulación de cultivos en la investigación. CROPGRO-Soybean se ha utilizado ampliamente para evaluar los efectos de las prácticas de manejo y las condiciones ambientales en el crecimiento y desarrollo de la soja. Algunas experiencias en este cultivos fueron las desarrolladas por Confalone et al. (2016), Jagtap y Jones (2002), Wang et al. (2003).

Entre los posibles análisis, CROPGRO permite optimizar el manejo del agua a partir de la generación de un balance hídrico diario (propuesto por Ritchie, 1998) que considera variables descriptivas de la dinámica del sistema y la capacidad de retención del suelo (Behrman et al., 2016). Por ejemplo, Bhatia et al. (2008) utilizaron el modelo CROPGRO para estimar los rendimientos potenciales en soja, limitados y no limitados por agua, para 21 localidades sojeras de India. Los resultados sugirieron que la brecha de rendimiento fue muy grande en lugares con baja precipitación durante la temporada de cultivo mientras que, se redujo en lugares con una mayor cantidad de lluvia en la temporada de cultivo.

Experiencias relacionadas al uso del agua en girasol han evaluado la magnitud del cambio de rendimiento con el atraso de la siembra, bajo distintas ofertas de agua. Para las dos localidades estudiadas, Reconquista y Las Breñas, se determinó que con buena recarga otoñal del perfil, el rendimiento medio en siembras tempranas de agosto era mayor y más seguro que en siembras tardías de septiembre (Mercau, 2010). De este modo, se logró determinar la importancia del efecto de la recarga de agua una vez que finaliza el ciclo del cultivo antecesor.

Por otro lado, Monzón et al. (2007) han trabajado sobre temas similares a los abordados en este trabajo de tesis. En su caso, complementaron el uso de los modelos

DSSAT Ceres-Wheat y CropGro-Soybean, simulando la producción a largo plazo del doble cultivo trigo/soja en la localidad de Balcarce. La distribución de frecuencia acumulada de rendimiento de la soja varió según el AD a la madurez fisiológica del trigo y se determinó que, tanto el AD en dicho momento, como las precipitaciones durante enero y febrero (coincidente con período crítico del cultivo), explicaron el 57% de la variación en los rendimientos en soja.

En este capítulo se exploró el comportamiento de dos GM de soja, de CC y CL, en respuesta a diferentes escenarios meteorológicos y condiciones hipotéticas de humedad a la siembra. De esta manera, mediante la simulación, se pretendió ampliar el rango de escenarios hídricos más allá de los realmente explorados en las campañas evaluadas en los Capítulos 2 y 3.

## **4.2 MATERIALES Y MÉTODOS**

Se utilizó el modelo CROPGRO-Soybean (Boote et al., 1998) para realizar simulaciones multianuales de rendimiento en soja para las condiciones ambientales de Paraná, enfatizando en el AD a la siembra. Para los inputs de experimentación se consideraron los datos diarios de la estación meteorológica local (temperatura del aire máxima y mínima, precipitaciones y radiación solar) mientras que, para los edáficos se utilizó la carta de suelos de Entre Ríos (Plan de Mapas de Suelos, 2000) y datos de experiencias locales para las variables capacidad de campo, PMP y densidad aparente (Wilson com. pers., ver Apéndice).

Los cultivares utilizados para la simulación fueron NA5009 (GM de CC) y A 6445 RG en representación de la DM6.8i (GM de CL). Este cambio se realizó debido a la existencia de coeficientes genotípicos confiables para A 6445RG, que posee una fenología similar a la variedad utilizada en los estudios experimentales descriptos en los capítulos anteriores, en este caso los días de emergencia a madurez de cosecha (R8) son de 152 y 159 días, respectivamente (INASE, 2018).

En una primera etapa, se evaluó la predicción del modelo comparando las situaciones obtenidas a campo versus las simuladas. Los valores de agua inicial ingresados en el modelo fueron los mismos que los computados a campo. También se tuvo en cuenta el antecesor y una densidad de plantas establecidas promedio de 25 pl m<sup>-2</sup>.

Para evaluar la performance del modelo en la simulación se utilizaron como parámetros el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y la raíz cuadrada de la varianza de los residuos (RMSE); este último indica la distancia entre los puntos observados y los predichos por el modelo. Las variables comparadas fueron la fenología, la evapotranspiración total (estimada como consumo del cultivo para los datos de campo) y, el rendimiento para las mismas condiciones hídricas iniciales, registradas con sonda de neutrones.

En una segunda etapa, se simularon y compararon las tres campañas en estudio, bajo una situación ambiental hipotética: período crítico ( $R5 \pm 15$  d, Tabla 4.1) sin precipitaciones (lluvias acumuladas 0 mm). De este modo, se evaluó el comportamiento de ambos GM bajo un escenario hídrico limitante para el rendimiento.

**Tabla 4.1.** Períodos de tiempo modificados, con precipitaciones anuladas, según cada campaña y grupo de madurez (GM) evaluado (CC: ciclo corto y CL: ciclo largo).

Campaña	GM	Periodo modificado (DDS)
2013/4	CC	63-91
	CL	72-100
2014/5	CC	64-92
	CL	77-105
2016/7	CC	64-92
	CL	78-106

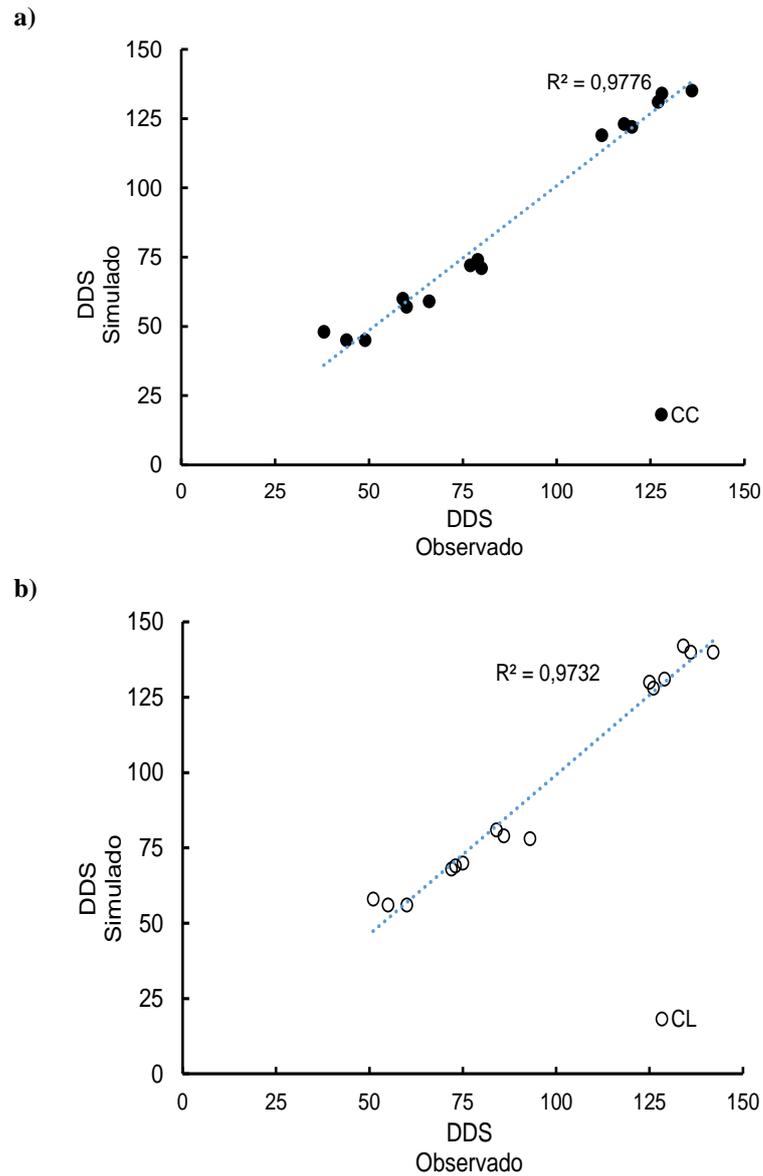
Por último, se analizó la respuesta al rendimiento de los dos cultivares elegidos, bajo diferentes situaciones hídricas y meteorológicas, considerando la serie 2000/01-2016/17.

### 4.3 RESULTADOS

#### 4.3.1 Validación del modelo a partir de valores observados

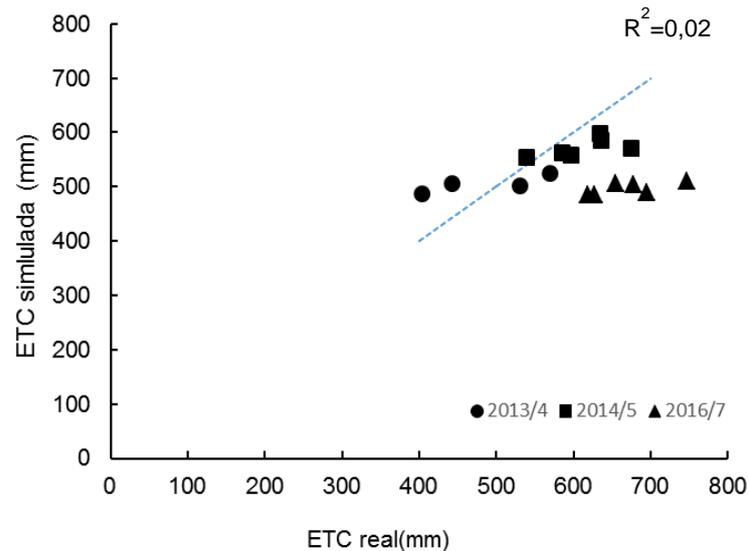
La fenología simulada fue semejante a la determinada en condiciones reales, incluso la del GM de CL. El RMSE para los CC fue de 5,4 días y de 5,9 para los CL (Figura 4.1). Una óptima calibración fenológica valida la correcta selección de los cultivares utilizados para comparar el resto de las variables.

Los cultivares simulados, NA5009 y A6445, presentaron una diferencia entre sí de 17 días para floración (R1) y de 14 días para MF (R7).



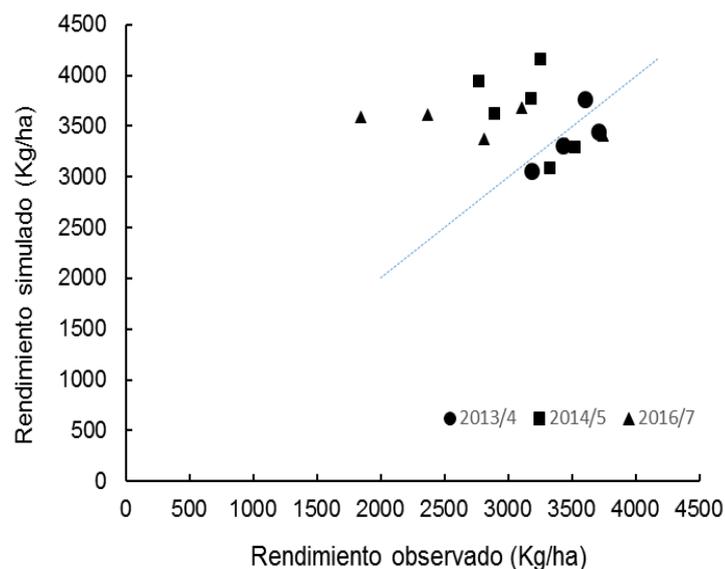
**Figura 4.1.** Fenología observada en **a)** cultivar NA5009 RG (CC) vs simulada y, **b)** observada en cultivar DM6.8i (CL) vs simulada con A6445 (CL), en días desde la siembra (DDS). Línea de puntos indica relación 1:1.

A diferencia de la fenología, la ETC (o consumo) careció de un buen ajuste,  $R^2=0,02$  y  $RMSE=101$  mm (Figura 4.2). La simulación arrojó un rango de valores relativamente estrecho de ETC, no reflejando la variabilidad estimada a partir de datos reales (Capítulo 2). Debido a ello, los valores simulados para la Campaña 3 fueron subestimados en comparación a los calculados para condiciones reales.



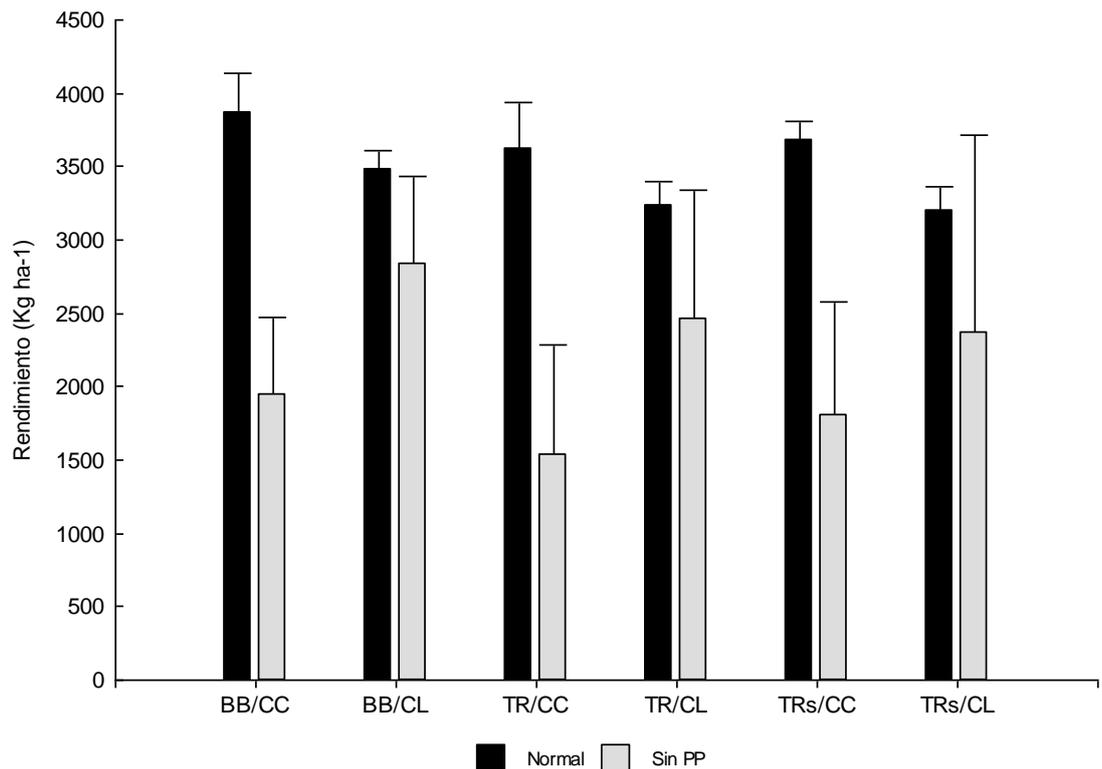
**Figura 4.2.** Comparación de evapotranspiración simulada y observada (corresponde a valores estimados para consumo). Los círculos representan la Campaña 2013/4, los triángulos Campaña 2014/5 y los cuadrados, 2016/7. Línea de puntos indica relación 1:1.

Los valores de rendimiento obtenidos a campo tampoco presentaron una correlación positiva con los simulados por el modelo ( $R^2=0,05$ ), se tuvo una considerable dispersión respecto a una relación 1:1. El RMSE obtenido fue de  $734 \text{ kg ha}^{-1}$ . En general, las mayores dispersiones se observaron en la Campaña 3, en la que los rendimientos observados mediante las cosechas fueron considerablemente más bajos que los estimados con el modelo (Figura 4.3).



**Figura 4.3.** Relación entre rendimiento simulado y observado, en  $\text{kg ha}^{-1}$ . Los círculos representan la Campaña 2013/4, los triángulos Campaña 2014/5 y los cuadrados, 2016/7. Línea de puntos indica relación 1:1.

Analizando las tres campañas bajo los hipotéticos escenarios, sin precipitaciones en el PC, se tuvo que la ausencia de precipitaciones en el PC redujo el rendimiento para todos los casos; estos efectos fueron marcados a nivel de GM ( $p=0,01$ ) mientras que no hubo diferencias significativas a nivel de antecesor ( $p>0,05$ ). El rendimiento del CL resultó más estable en comparación a las condiciones normales, las caídas fueron en promedio del 22%. Y por el contrario, el CC presentó mayor penalidad, con caídas de hasta 50% (Figura 4.4).



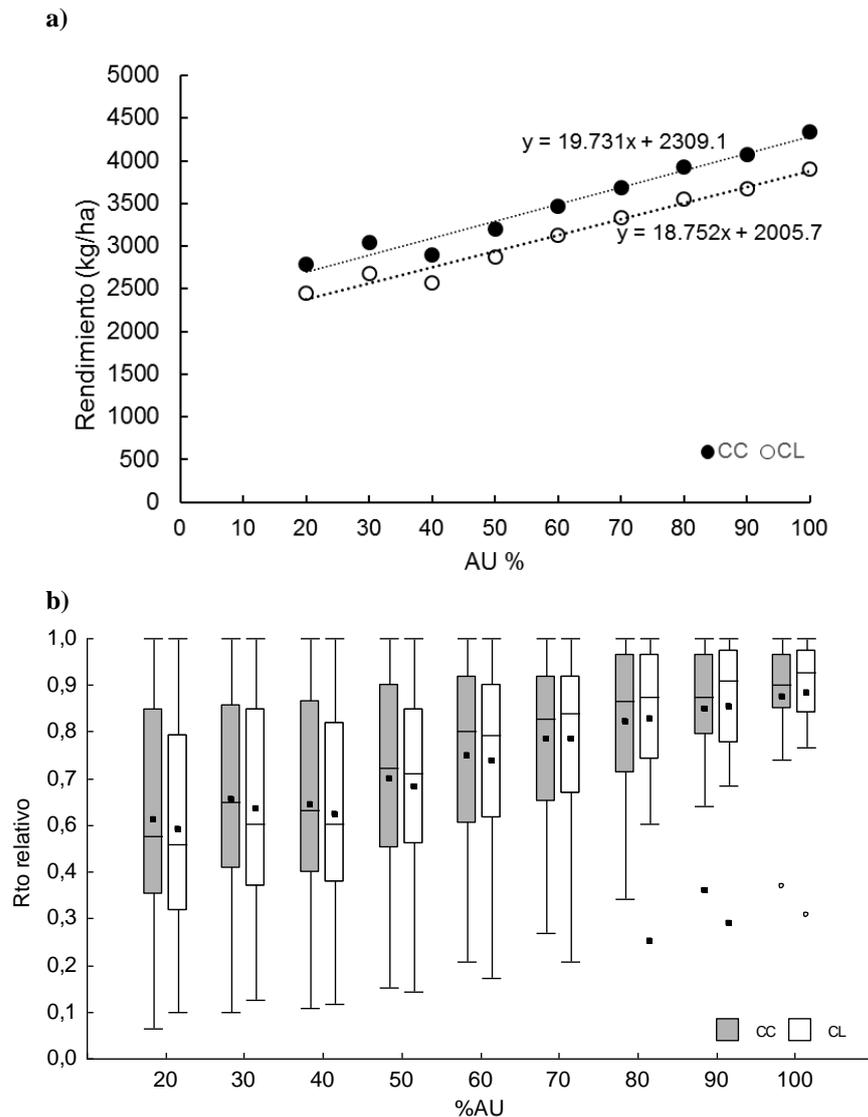
**Figura 4.4.** Rendimiento simulado (promedio 3 campañas) con régimen hídrico normal en periodo crítico (PC) y con régimen hídrico modificado en PC (sin precipitaciones). BB, Tr y TR\_s indican antecesores barbecho, trigo y trigo+shelter, CC y CL son los cultivares de soja de ciclo corto y largo, respectivamente.

### 4.3.2 Análisis exploratorio de datos para una serie de años

Explorando los rendimientos medios, para la serie 2000/1-2016/7, se observó que estos aumentaron de manera continua a medida que se incrementaba el nivel de agua útil (AU)<sup>3</sup> inicial en el suelo; en valores absolutos, el rendimiento del GM más corto superó al CL (+360 kg ha<sup>-1</sup> aproximadamente por cada 10% de aumento del AU; Figura 4.5.a).

<sup>3</sup> El término agua útil (AU) fue definido en la ecuación 5 del Capítulo 2; expresa la disponibilidad de agua en relación a la diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente, en términos de porcentaje.

La variabilidad interanual de los rendimientos fue similar entre los dos GM evaluados; en ambos casos, con bajos contenidos de AU a la siembra hubo mayor dependencia de las restantes condiciones meteorológicas que se presentaron cada año. Esta mayor variabilidad estuvo asociado a que los rendimientos presentaron “pisos” más bajos con menores contenidos de agua útil y “techos” similares, independientes del contenido de agua inicial (Figura 4.5.b).



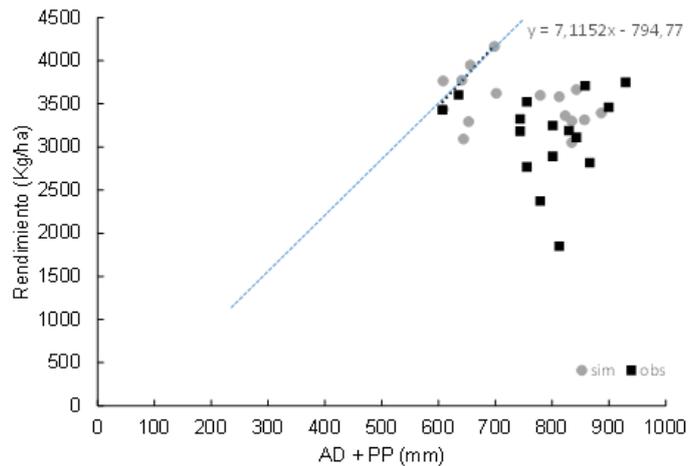
**Figura 4.5. a)** Efecto de la disponibilidad de agua disponible a la siembra (mm, en 1,20 m) sobre el rendimiento simulado ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para grupo de madurez de ciclo corto (CC) NA5009 (puntos llenos) y cultivar ciclo largo (CL) A6445 (puntos vacíos). **b)** Variación interanual del rendimiento relativo<sup>4</sup> para 16 escenarios climáticos (2000-16), barras oscuras (CC) y barras claras (CL).

<sup>4</sup> El rendimiento relativo fue estimado como la relación entre el rendimiento para un año “X” y el máximo para la serie considerada.

#### 4.4 DISCUSIÓN

En referencia a la calibración del modelo, la fenología tuvo un buen ajuste entre lo observado vs. lo simulado. En cambio, las estimaciones de ETC y rendimiento difirieron con relación a lo observados, particularmente en la Campaña 3. Las causas de estas discrepancias no están claras, y pueden incluir, por ejemplo, una diferente consideración de la precipitación efectiva. En esta campaña, existieron precipitaciones abundantes al inicio del ciclo (Capítulo 2) que, posiblemente, generaron pérdidas que no fueron consideradas por el modelo. Asimismo, las diferentes evoluciones de la intercepción de radiación según antecesor (Capítulo 3) no parecen haber sido capturadas por el modelo. De hecho, los rendimientos simulados para la Campaña 3 tuvieron variaciones muy leves en relación al antecesor, siendo estas de sólo 20-30 kg ha<sup>-1</sup>.

Frente a la destacable incidencia de las precipitaciones, resulta interesante analizar la productividad del agua estableciendo la función límite de la relación entre los rendimientos y la oferta hídrica estacional, ADi+PP (Figura 4.6). A partir de una cuantiosa base de datos, Grassini et al. (2015) establecieron una función límite del cuantil superior para determinar la eficiencia máxima de utilización. Para sus datos, correspondientes al cordón maicero de Nebraska, obtuvieron una productividad máxima de 9,9 kg ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>. Para los datos generados en este trabajo y, considerando tanto los valores observados como los simulados, la eficiencia máxima fue de 7 kg ha<sup>-1</sup>mm<sup>-1</sup>, lo que coincide con otras aproximaciones para leguminosas que toman un rango 7 a 12 kg ha<sup>-1</sup>mm<sup>-1</sup> (Hocking et al., 1997; Zhang et al., 2000).



**Figura 4.6.** Rendimientos ( $\text{Kg ha}^{-1}$ ) observados (cuadrados) y simulados (círculos) en función del agua disponible a la siembra (AD, mm) y las precipitaciones (PP, mm) durante el ciclo. Línea de puntos función de referencia establecida por Grassini et al. (2015).

La dispersión de los puntos hacia la derecha de la función de máxima productividad demuestra que hubo ineficiencias en el sistema, es decir, excesos de agua que no fueron aprovechados para convertirse en grano. Dichos valores se ubicaron por encima de 650 mm, valores identificados por Grassini et al. (2015) como la oferta suficiente para satisfacer los requerimientos hídricos del cultivo y obtener respuesta al rendimiento. Esos resultados coinciden con el bajo impacto, en términos generales, que se encontró del ADi en dos de las tres campañas estudiadas y fortalecen la idea de que un cultivo invernal incrementaría la EUA a nivel de sistema. No obstante, algunos datos observados que se encuentran por encima de este valor no se corresponden con máximas productividades, sugiriendo la existencia de otras limitantes involucradas.

Mediante los resultados derivados de la simulación de la serie climática 2000/1-2016/7, se encontró que el GM de CC evaluado presentó rendimientos mayores que el CL (Figura 4.1.a), pero una respuesta similar al incremento de agua inicial. Asimismo, se encontró que el rango de variabilidad de los rendimientos ante diferente oferta de agua inicial fue muy similar para ambos (Figura 1.b). Más importante que el GM, en las simulaciones tuvo un peso importante en la variabilidad de rendimientos el contenido de agua inicial. En coincidencia, en los capítulos experimentales se mencionó la mayor variabilidad de los resultados en cultivos de soja luego de trigo, es decir, con menor contenido de agua inicial. De acuerdo con las simulaciones, es posible maximizar rendimientos aun partiendo de bajos contenidos de agua a la siembra; el régimen hídrico de Paraná permitiría que, en algunos años, se produzca una recarga del perfil durante el ciclo de la soja tal que permita revertir bajos contenidos iniciales de agua. No obstante,

la posibilidad de obtener rendimientos muy bajos sólo se reduce fuertemente partiendo de perfiles con más de un 80% de contenido de agua inicial. De acuerdo a las mediciones reportadas en el Capítulo 2, esta situación no parecería las más frecuente partiendo de un antecesor invernal.

**CAPITULO 5:**  
**CONCLUSIONES GENERALES**

Los resultados obtenidos en este trabajo permitieron responder a los objetivos planteados respecto al impacto que tiene el agua disponible a la siembra sobre el consumo hídrico, el rendimiento y la eficiencia de uso del agua en soja, considerando además, diferentes alternativas productivas.

En las parcelas con antecesor trigo se tuvieron situaciones, a la siembra de la soja, de almacenamientos inferiores a 50% AU (campañas 2 y 3), lo que implica niveles de humedad por debajo del límite en el cual las plantas comienzan a manifestar síntomas de deficiencia hídrica (Sadras y Milroy, 1996). Sin embargo, para esas situaciones más comprometidas, transcurridos los 20-30 días DDS el nivel de AU aumentó al 50-60% AU y se igualó con el tratamiento BB (Figura 2.3). Por lo tanto, para las condiciones climáticas de Paraná, con primaveras generalmente húmedas, es posible lograr adecuados perfiles hídricos para la siembra de soja, aun con barbechos muy cortos como los derivados de un cultivo de invierno.

Resultados similares a los descriptos también fueron observados por Capurro et al. (2010), en Oliveros- Santa Fe, con el uso de cultivos de cobertura (CdeC) previos a soja. Para este caso, la ocurrencia de lluvias de alto milimetraje en septiembre permitió que los CdeC dejaran reservas del 70 a 80% del AU para la soja siguiente.

Respecto al consumo asociado al ciclo del GM, el cultivar CL superó al del CC (Tabla 2.7). Al igual que lo determinado por Andriani (2016), a medida que un mismo cultivo alarga su ciclo aumenta la cantidad total de agua consumida. No obstante, la dinámica del consumo analizada en el tiempo, no presentó variaciones entre los dos GM estudiados (Figura 2.5).

Por otra parte, el balance hídrico diario estimado indicó que, el agua almacenada inicialmente podría contribuir levemente al consumo del GM de CC, durante su período reproductivo, no así en un GM más largo como DM6.8i (Figura 2.6). Por lo tanto, se aceptan tanto la hipótesis I.a como la I.b.

Los mayores rendimientos, en general, se observaron en el tratamiento BB aunque no pudo determinarse una correlación positiva entre el rendimiento y ADi (Figura 3.4). En respuesta al agua almacenada en el perfil, Caviglia et al. (2008), obtuvieron que, la implementación de alternativas invernales no comprometió de manera importante las reservas de agua en el suelo ni el rendimiento del cultivo de soja, que estuvo para todos los casos entre 3000 y 3300 kg ha<sup>-1</sup>.

Esta respuesta sería atribuible a la gran plasticidad del cultivo de soja. También, Capurro et al. (2010) en sus estudios con CdeC, determinaron que el rendimiento no estuvo asociado a los antecesores evaluados y que el consumo de agua de los CdeC no era limitante para la producción del grano grueso. En cambio, demostraron un fuerte efecto año, a través de las temperaturas y las precipitaciones, sobre el rendimiento.

Estas apreciaciones parecieran ratificar el concepto de que en soja las mayores disminuciones en el rendimiento se producen cuando los recursos son limitantes entre la generación de vainas y el llenado de granos (Karam et al., 2005) y no en etapas vegetativas. Algunas aserciones que refieren a esto, son la de Egli et al. (1983), quienes generaron estrés hídrico en soja entre la siembra y R5 y no detectaron diferencias en rendimiento con el testigo sin deficiencias. Por el contrario, Andriani (2000), evaluando grupos de IV al VII determinó disminuciones del rendimiento del 10% por deficiencias hídricas en las etapas vegetativas.

En relación a lo anterior, un bajo contenido de agua almacenada a la siembra de soja tampoco tuvo impacto consistente en reducir la  $EUAR$ , en ninguno de los dos cultivares, Sólo se entró una situación (TR/CC durante la Campaña 3; Tabla 3.6) en la que se redujo la EUR. Por lo tanto, no hubo evidencia suficiente para aceptar la hipótesis II.

Como se vio en Capítulo 4, Grassini et al. (2015) definieron una respuesta del rendimiento al ADi+PP siempre que la suma de estos componentes fuera inferior a 650 mm totales durante el ciclo. Cuando la oferta fue superior a este valor no hubo incrementos del rendimiento y por lo tanto, el agua no sería el recurso limitante para una mayor productividad. Para las condiciones en este trabajo analizadas, la situación demostró ser similar, con la mayoría de los datos generados ubicados por encima de los 650 mm. Esto manifiesta que hubo un exceso de agua que no fue aprovechado por el cultivo para su conversión en biomasa o rendimiento y que pudieron existir otras limitaciones, no medidas en este trabajo que pudieron limitar el rendimiento

En conformidad con las condiciones climáticas que han caracterizado las últimas campañas agrícolas, con registro de lluvias intensas en cortos períodos de tiempo, es considerable la contribución de la intensificación agrícola para lograr sistemas más sustentables. En este sentido, Mercau et al. (2016) analizando diferentes alternativas a la regulación y manejo de la fluctuación del agua a través de la selección de cultivos, determinaron que mediante la incorporación de doble cultivos se puede reducir el riesgo por inundaciones primaverales aunque no logra un efecto substancial a largo plazo en el

perfil hídrico. Si bien, las inundaciones no son un problema para el centro oeste de Entre Ríos por las características del paisaje, las lluvias intensas sí amenazan con las pérdidas por escorrentía, incrementando los riesgos de erosión.

Mediante la simulación, se tuvo que el CC rindió más que el CL (Figura 4.1.a) y, de acuerdo al supuesto planteado en la hipótesis III.b: “en escenarios con óptimos contenidos de agua a la siembra, los mayores rendimientos se obtienen con CC” los resultados obtenidos se ajustarían a dicha afirmación. Se destaca que también, en escenarios con menor contenido de agua, NA5009 fue superior a A6445. La discrepancia con los resultados de campo, podrían estar asociados a diferencias genotípicas entre los cultivares de ciclo largo utilizados para la validación del modelo, A6445 y DM 6.8. No obstante, tanto en los experimentos como en las simulaciones se incluyó un solo cultivar de cada ciclo, por lo tanto, la inferencia de estas conclusiones requiere la evaluación de un mayor número de cultivares.

Finalmente, no se encontró que la variabilidad de los rendimientos ante diferente oferta de agua inicial fuera mayor en variedades de CC respecto a las de CL (Figura 4.5.b), rechazando la Hipótesis III.a.

#### *Futuras líneas de trabajo de investigación*

Como futuras líneas de investigación, en continuidad con este trabajo, se propone:

- Realizar una red de evaluación de ADi a la salida de diferentes antecesores invernales, incluyendo cultivos de servicio, en diferentes suelos de la región. Evaluar su relación con el estado hídrico al inicio y al final del período crítico y el rendimiento de la soja. Acompañar el monitoreo del estado hídrico con el de P y N, para analizar posibles co-limitaciones.
- Determinar de manera conjunta al ADi la incidencia del AD durante el PC de la soja. Para el análisis de esta última variable habrían de compararse dos situaciones hídricas contrastantes que, según las condiciones meteorológicas podrían lograrse mediante riego o shelters “rain out”. La metodología mediante shelters debería de mejorarse respecto el tipo de estructuras empleadas en esta tesis, de modo que puedan adecuarse al crecimiento y altura de las plantas, ser de fácil manipulación para su apertura/cierre e impedir de manera absoluta el ingreso de agua de escorrentía a la parcela (nivelación de la estructura de acuerdo a la pendiente del terreno).

## BIBLIOGRAFÍA

Abbate P., Andrade F., Culot J.P. 1995. The effect of radiation and nitrogen on number of grains in wheat. *The Journal of Agricultural Science* 124: 351-360.

Albarenque S. 2015. Tesis de Maestría (en Producción Vegetal): Variabilidad espacial de la co-limitación de agua y nitrógeno, efecto sobre la eficiencia de uso de agua y nitrógeno en maíz. FAUBA, Buenos Aires, 115 p.

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrig. and Drain. Pap.* 56.

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

Andrade J.F., Poggio S.L., Ermácora M., Satorre E.H. 2015. Productivity and resource use in intensified cropping systems in the Rolling Pampa, Argentina. *Europ. J. Agronomy* 67: 37-51.

Andrade F. y Sadras V.O. 2000. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. Pp. 172-201 en: Andrade F.H., Sadras V.O. (Eds.). Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. EEA INTA Balcarce/Facultad de Ciencias Agrarias UNMP.

Andrade J.F. y Satorre E.H. 2015. Single and double crop systems in the Argentine Pampas: Environmental determinants of annual grain yield. *Field Crops Res.* 177: 137-147.

Andriani J.M. 2000. Estrés Hídrico en Soja. Para mejorar la Producción 13: 48-51.

Andriani J.M. 2016. Lo que hay que saber consumo de agua de los cultivos. Para Mejorar La Producción 55: 99-107.

Andriani J.M., Andrade F.H., Suero E.E., Dardanelli J.L. 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans. I. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and its components. *Agronomie* 11: 737-746.

Aramburu Merlos F., Monzon J.P., Mercau J., Taboada M., Andrade F. et. al. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Res.* 184: 145-154.

Battisti R. y Sentelhas P.C. 2014. New agroclimatic approach for soybean sowing dates recommendation: A case study. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 18: 1149-1156.

BCR (Bolsa de Cereales de Rosario). 2016. Informativo semanal 1750. [https://www.bcr.com.ar/Pages/Publicaciones/informativosemanal\\_noticias.aspx?pIdNoticia=55](https://www.bcr.com.ar/Pages/Publicaciones/informativosemanal_noticias.aspx?pIdNoticia=55). Acceso Marzo de 2018.

Behrman K.D., Norfleet M.L., Williams J. 2016. Methods to estimate plant available water for simulation models. *Agricultural Water Management* 175: 72-77.

Bert F.E. y Satorre E.H. 2013. Factores determinantes de la productividad de soja en la Argentina. Tercera jornada del Instituto de Investigaciones en Biociencias Agrícolas y Ambientales: Aportes de la microbiología a la producción de cultivos.

Bhatia V.S., Singh P., Wani S.P., Chauhan G.S., Rao A.V., Mishra A.K., Srinivas K. 2008. Analysis of potential yields and yield gaps of rainfed soybean in India using CROPGRO-Soybean model. *Agricultural and forest meteorology* 148: 1252–1265.

Birch C.J, Hammer G.L, Rickert K.G. 1999. Dry matter accumulation and distribution in five cultivars of maize (*Zea mays*): relationships and procedures for use in crop modeling. *Aus. J. Agric. Res.* 50: 513-527.

Bolsacer (Bolsa de Cereales de Entre Ríos). 2017. <http://www.bolsacer.org.ar/Fuentes/estadisticas.php>. Acceso: 10 de enero de 2017.

Boote K.J., Jones J.W., Hoogenboom G., Pickering N.B. 1998. The CROPGRO model for grain legumes. Pp. 99-128 en Tsuji G.Y., Hoogenboom G., Thornton P.K. (Eds.). *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, Boston.

Calviño P.J. y Monzon J.P. 2009. Farming systems of Argentina: yield constraints and risk management. Pp. 55-67 en Sadras, V.O. Calderini, D. (Eds.). *Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy*.

Calviño P.A., Sadras V.O., Andrade F.H. 2003a. Development, growth and yield of late-sown soybean in the southern Pampas. *Europ. J. Agronomy* 19: 265-275.

Calviño P.A., Sadras V.O., Andrade F.H. 2003b. Quantification of environmental and management effects on the yield of late-sown soybean. *Field Crops Res.* 83: 67-77.

Calviño P.A., Studdert G., Abbate P., Andrade F.H., Redolatti M. (2002). Use of non-selective herbicides for wheat physiological and harvest maturity acceleration. *Field Crops Res.* 77: 191–199.

Carfagno P.F., Eiza M.J., Quiroga A., Babine F., Chagas C., Michelena R. 2013. Agua disponible en monocultivo de soja con cultivos de cobertura y barbechos reducidos en la región semiárida y subhúmeda Pampeana. *Ciencia del Suelo- AACS* 31: 67-81.

Caviglia O.P. y Andrade F.H. 2010. Sustainable Intensification of Agriculture in the Argentinean Pampas: Capture and Use Efficiency of Environmental Resources. *The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology* 3: 1-8.

Caviglia O.P, Novelli L., Gregorutti V.C, van Opstal N.V, Melchiori R.J. 2013. Cultivos de Cobertura invernales: una alternativa de intensificación sustentable en el centro- oeste de Entre Ríos. Pp 148-156 en Álvarez C. et al. (Eds.). *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción*. Editorial INTA.

Caviglia O.P., Sadras V.O., Andrade F.H. 2004. Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat–soybean. *Field Crops Res.* 87, 117-129.

Caviglia O.P., Van Opstal N.V, Gregorutti V.C., Melchiori R.J., Blanzaco E. 2008. El invierno: Estación clave para la intensificación sustentable de la agricultura. *Agricultura Sustentable, Actualización Técnica EEA INTA Paraná* 51: 7-13.

Coll L., Caviglia O.P, Van Opstal N.V. 2011. Rendimiento de soja de segunda sobre diferentes antecesores invernales. *Actualización técnica de soja EEA INTA Paraná* 62: 75-82.

Collino D. J., Dardanelli J. L., Sereno R., Racca R.W. 2001. Physiological responses of argentine peanut varieties to water stress: Light interception, radiation use efficiency and partitioning of assimilates. *Field Crops Res.* 70: 177–184.

Confalone A., Vilatte C., Lázaro L., Roca N., Mestelan S., Aguas L., Navarro M., Sau F. 2016. Parametrización del modelo CROPGRO-soybean y su uso como herramienta para evaluar el impacto del cambio climático sobre el cultivo de soja. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo* 48: 49-64.

Damiano F. y Taboada M.A. 2000. Predicción del agua disponible usando funciones de pedotransferencia en suelos agrícolas de la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 18: 77-88.

Daniels M.B. y Scott H.D. 1991. Water Use Efficiency of double cropped wheat and soybean. *Agronomy J.* 83: 564-570.

Dardanelli J.L., Collino D., Otegui M.E., Sadras V.O. 2008. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. Pp. 375-440 en Satorre E. et al. (Eds.). *Producción de Granos. Bases funcionales para su Manejo.* Editorial FAUBA.

Dardanelli J.L., Ritchie J.T., Calmon M., Andriani J.M., Collino D.J. 2004. An Empirical Model for Root Water Uptake. *Field Crops Res.* 87: 59-71.

Della Maggiora, A.I., Gardiol J.M., Irigoyen A.I. 2000. Requerimientos hídricos. Pp 155-171 en: Andrade F.H. y Sadras V.O. (Eds.). *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja.* EEA INTA Balcarce y Fac. de Ciencias Agrarias UNMP.

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. 2017. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Di Rienzo J., Guzmán W., Casanoves F. 2002. “D.G.C., Test de Comparación de Medias. InfoStat Versión 1.1/Profesional” Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar/>.

Dogan E., Kirnak H., Copur O. 2007. Effect of seasonal water stress on soybean and site specific evaluation of CROPGRO-Soybean model under semi-arid climatic conditions. *Agricultural Water Management* 90: 56-62.

Egli D.B. 1993. Cultivar maturity and potential yield of soybean. *Field Crops Research*, 32: 147–158.

Egli D.B. 1994. Cultivar Maturity and Reproductive Growth Duration in Soybean. *J. of Agronomy & Crop Science* 173: 249-254.

Egli D.B. y Bruening W.P. 2000. Potential of Early-Maturing Soybean Cultivars in Late Plantings. *Agronomy J.* 92: 532–537.

Eiza M. J.; Carfagno P. F; Quiroga A. y R. O. Michelena R.O. 2012. Inclusión de cultivos de cobertura en monocultivo de soja: un paso hacia el mejor aprovechamiento del agua pluvial. *Cuadernos del Curiham* 18, 39-49.

Evans L.T. 1993. *Crop Evolutions, Adaptations and Yield.* Cambridge University Press, Cambridge, UK. 500 p.

Faraldo M.L, Vergara G.T., Casagrande G.A, Arnaiz J.P, Mirasson H., Ferrero C. 2011. Eficiencia en el uso del agua y radiación en maíz, girasol y soja, en la región oriental de la pampa, argentina. *Agronomía Tropical* 61: 47-57.

Fehr W.R. y Caviness C.E. 1977. Stages of soybean development. Cooperative Extension Service, Agriculture and Home Economics. Iowa State University Special Report 80: 929–931.

Fernández Long M.E., Spescha L.B., Barnatán I.E., Murphy G.M. 2012. Modelo de balance hidrológico operativo para el agro (BHOA). *Agronomía y ambiente* 32: 31-47.

French R.J. y Schultz J.E. 1984. Water use efficiency of wheat in a Mediterranean type environment. I. The relation between yield, water use and climate. *Aust. J. Agric. Res.* 35, 743–764.

Gallo K.P. y Daughtry C.S. 1986. Techniques for measuring intercepted and absorbed photosynthetically active radiation in crop canopies. *Agronomy J.* 78: 752-756.

Grassini P., Torrión J.A., Yang H.S., Rees J., Andersen D., Cassman K.G., Specht J.E. 2015. Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt. *Field Crops Res.* 179: 160-173.

Hu M. y Wiatrak P. 2012. Effect of Planting Date on Soybean Growth, Yield, and Grain Quality. Review. *Agronomy J.* 104: 785–790.

INASE (Instituto Nacional de Semillas). 2018. <https://www.argentina.gob.ar/inase/descripciones-de-variedades>. Acceso: Agosto de 2018.

Jagtap, S. S. y Jones, J. W. 2002. Adaptation and evaluation of the CROPGRO-soybean model to predict regional yield and production. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 93: 73–85.

Kane M. y Grabau L. 1992. Early planted, early maturing soybean cropping system: Growth development and yield. *Agronomy J.* 84: 769-773.

Kantolic A.G. 2008. Control ambiental y genético de la fenología del cultivo de soja: impactos sobre el rendimiento y la adaptación de genotipos. *Revista de la Facultad de Agronomía* 28: 63-88.

Kantolic A.G., Mercau J.L., Slafer G.A., Sadras V.O. 2007. Simulated yield advantages of extending post-flowering development at the expense of a shorter pre-flowering development in soybean. *Field Crops Res.* 101: 321-330.

Kantolic A.G. y Slafer G.A. 2001. Photoperiod sensitivity after flowering and seed number determination in indeterminate soybean cultivars. *Field Crops Res.* 72: 109-118.

Karam F., Masaad R., Mounzer O., Rouphael Y. 2005. Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. *Agricultural Water Management* 75: 226–244.

Lehrsch G.A., Whisler F.D., Buehring N.W. 1994. Cropping system influences on extractable water for mono- and double-cropped soybean. *Agricultural Water Management* 26: 13-25.

MAGyP (Ministerio de Agroindustria). 2018. <http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>. Acceso junio 2018.

Manuel-Navarrete D., Gallopín G.C., Blanco M., Díaz-Zorita M., Ferraro F.O., Herzer H., Láttera P., Murmis M.R., Podestá G., Rabinovich J., Satorre E.H., Torres

F., Viglizzo E.F. 2009. Multi-causal and integrated assessment of sustainability: the case of agriculturization in the Argentine Pampas. *Environ. Dev. Sustain.* 11: 621-638.

Mercau J. 2010. El agua y la temperatura como limitantes del rendimiento de girasol bajo planteos de alta tecnología en el NEA. Evaluación basada en series climáticas y un modelo de simulación. Cuadernillo informativo ASAGIR 17: 8-12.

Mercau J.L., Dardanelli J.L., Collino D.J., Andriani J.M. 2007. Predicting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. *Field Crops Res.* 100: 200-209.

Micucci F.G., Taboada M.A, Gil R. 2005. El agua en los sistemas extensivos: Consumo y eficiencia de uso del agua de los cultivos. *IPNI Archivo Agronómico* 7: 1-4.

Monzón J.P., Sadras V.O., Abbate, P., Caviglia, O.P. 2007. Modelling management strategies for wheat-soybean double crops in the south-eastern Pampas. *Field Crops Res.* 101: 44-52.

Monteith J.L. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecol.* 9: 747-765.

Muchow R.C., Sinclair T. R., Bennett J.M. 1990. Temperature and Solar Radiation Effects on Potential Maize Yield across Locations. *Agronomy J.* 82: 338-343.

Nico M., Miralles D.J., Kantolic A.G. 2015. Post-flowering photoperiod and radiation interaction in soybean yield determination: Direct and indirect photoperiodic effects. *Field Crops Res.* 176: 45-55.

Nosetto M.D., Paez R.A., Ballesteros S.I., Jobbágy E.G. 2015. Higher water-table levels and flooding risk under grain vs. livestock production systems in the subhumid plains of the Pampas. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 206: 60-70.

Novelli L. 2013. Tesis doctoral (en Ciencias Agrarias): Intensificación de las secuencias de cultivos en un Molisol y un Vertisol: cambios en la estabilidad estructural y en el almacenaje de C en agregados. FAUBA, Buenos Aires, 127 p.

Otegui M.E. 2015. Bases ecofisiológicas para el manejo del agua en cultivos para grano conducidos en secano. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 44: 16-20.

Peltzer H.F. 2007. Efecto de la fecha de siembra sobre el rendimiento potencial de soja en Entre Ríos. INTA Paraná, Actualización Técnica de Soja 45: 16-18.

Peltzer H.F., Santos D.J., Valentinuz O.R. 2004. Planting date and duration of the setting pod period in determinate and indeterminate soybean cultivars. VII World Soybean Research Conference abstracts Foz de Iguazu, Brazil.

Peltzer H.F. y Santos D.J. 2009. Sowing date effects on growth and development of soybean cultivars with determinate stem growth habit. VIII WSRC Proceedings, Beijing, China.

Pietrarelli L., Zamar J.L, Arborno M., Sanchez J., Leguía H.L. 2014. Effects of a winter cover crop consociated on water dynamics and summer crop production in the region center of Cordoba, Argentina. *AgriScientia* 31: 43-48.

Plan mapa de suelos, convenio INTA-Gobierno de Entre Ríos. 1998. Carta de Suelos de la República Argentina. Serie Relevamiento de Recursos Naturales 17, 114 p.

Pinto P., Fernández Long M.E., Piñeiro G. 2017. Including cover crops during fallow periods for increasing ecosystem services: Is it possible in croplands of Southern South America? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 248: 48-57.

Prieto S. 2011. Tesis de maestría: Eficiencia transpiratoria como atributo de tolerancia al déficit hídrico en soja (*Glycine max* (L.) Merrill): variabilidad intraespecífica y su asociación con la estabilidad del rendimiento. Fac. Agronomía UBA, Buenos Aires. 114 p.

Quiroga A., Adema E., Buschiazzo D., Peinemann, N. 1996. Efecto de dos sistemas de labranzas sobre el rendimiento de trigo y sorgo, y propiedades de un Haplustol Entico en la región semiárida pampeana. XV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, pp. 213.

Rauff K.O. y Bello R. 2015. A Review of Crop Growth Simulation Models as Tools for Agricultural Meteorology. *Agricultural Sciences* 6: 1098-1105.

Restovich S.B., Andriulo A.E., Portela S.I. 2012. Introduction of cover crops in a maize-soybean rotation of the Humid pampas: Effect of nitrogen and water dynamics. *Field Crops Res.* 128: 62-70.

Richards R.A. 2000. Selectable traits to increase crop photosynthesis and yield of grain crops *J. Exp. Bot.* 51: 447-458.

Ridley N. 2013. Cultivos de cobertura en el sur de Santa Fe: Efectos sobre la eficiencia de barbecho y la porosidad del suelo. Pp 7-15 en: Alvarez C, Quiroga A, Santos D, Bodrero M (Eds.). *Contribuciones de los cultivos de coberturas a la sostenibilidad de los sistemas de producción.* Editorial INTA.

Ritchie J.T. 1998. Soil water balance and plant stress. 1998. Pp. 41-54 en Tsuji, G.Y. Hoogenboom, G. Thornton P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production,* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

Rodríguez H.J., De Battista J.J., Dardanelli J.L. 2011. Eficiencia en el uso del agua en soja y maíz en un vertisol de Entre Ríos. *Mercosoya, Rosario.*

Rodríguez H.J. 2017. Respuesta del maíz y la soja a distintos niveles de riego suplementario en un Vertisol de Entre Ríos. *Fac. Agronomía UBA, Buenos Aires.* 113p.

Sadras V.O y Milroy S.P. 1996. Soil water thresholds for the responses of leaf expansion and gas Exchange: A review. *Field. Crop. Res.* 47, 253-266.

Salado-Navarro L.R., Sinclair T.R. 2009. Crop rotations in Argentina: Analysis of water balance and yield using crop models. *Agricultural Systems* 102: 11-16.

Santos D. J., Müller M., Peltzer H.F. 2011. Rendimiento y fenología de variedades comerciales de soja en Paraná. Siembras en fecha óptima y tardía en la campaña 2010/11. *Actualización Técnica Soja EEA INTA Paraná* 62: 9-24.

Salvagiotti F., Enrico J. M., Bodrero M. 2010. Producción de soja y uso eficiente de los recursos. *INTA Oliveros, Para Mejorar La Producción* 45: 151-154.

Salvagiotti F., Collino D.J., Peticari A., Piccinetti C., Ovando G., Urquiaga S., Racca R.W. 2016. El aporte de la fijación biológica de nitrógeno en el cultivo de soja en Argentina. *INTA Oliveros, Para Mejorar La Producción* 54: 145-150.

Schou J.B., Jeffers D.L., Streeter J.G. 1978. Effect of reflectors black boards, or shades applied at different stages of plant development on yield of soybeans. *Crop Science* 18: 29-34.

Sinclair T.R., de Wit C.T. 1975. Photosynthate and Nitrogen Requirements for Seed Production by Various Crops. *Science* 189: 565-567.

Sinclair T.R., Messina C.D., Beatty A., Samples M. 1992. Soybean yield in Argentina in response to weather variation among cropping seasons. *Field Crops Res.* 30: 1-11.

Sinclair T.R. y Muchow R. 1999. Radiation Use Efficiency. *Advances in Agronomy* 65: 215-265.

Souza P.J., Ribeiro A., da Rocha E. Bouça Farias J.R, Silva Loureiro R., Bispo C.C., Sampaio L. 2009. Solar radiation use efficiency by soybean under field conditions in the Amazon region. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 44: 1211-1218.

Stöckle C.O. y Kemanian A.R. 2009. Crop radiation capture and use efficiency: a framework for crop growth analysis. *Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy*. Academic Press, San Diego, CA, USA, 145-170.

Taboada M.A. y Varela M.F. Impacto de las rotaciones de cultivos en los suelos. 2014.<http://www.aapresid.org.ar/wp-content/uploads/2014/12/RotaciondecultivosTaboada.docx.pdf>. Acceso: 30 agosto de 2018.

Valentinuz O.R. 1996. Crecimiento y rendimiento comparados de girasol, maíz y soja ante cambios de densidad de plantas. Tesis M. Sci. Fac. Cs. Agrarias. UNMDP.

van Opstal N.V., Caviglia O.P., Melchiori R.J. 2011. Water and solar radiation productivity of double crops in humid temperate area. *Aust. J. of Crop Sci.* 5: 1760-1766.

Viglizzo E.F, Ricard M.F, Jobbágy E.G, Frank F.C, Carreño L.V. 2011. Assessing the cross-scale impact of 50 years of agricultural transformation in Argentina. *Field Crops Res.* 124: 186–194.

Wang F., Fraise C.W., Kitchen N.R., Sudduth K.A. 2003. Site-specific evaluation of the CROPGRO-soybean model on Missouri claypan soils. *Agricultural Systems* 76: 985–1005.

Williams J.H. y Boote K.J. 1995. Physiology and modelling-predicting the unpredictable legume. En: Pattee, H.E., Stalker, H.T. (Eds.). *Advances in Peanut Science*. Am. Peanut Res. Educ. Soc., Stillwater, OK.

Zhang H., Pala M., Oweis T., Harris H. 2000. Water use and water-use efficiency of chickpea and lentil in a Mediterranean environment. *Aus. J. Agric. Res.* 51: 295 - 304.

Zixi Z, Stewart BA, Xiangjun F. 1994. Double cropping wheat and corn in a sub-humid region of China. *Field Crops Research* 36: 175-183.

## APÉNDICE

### Caracterización de la serie Tezanos Pintos

Pertenece a la familia "fina, mixta, térmica" de los *Argiudoles ácuicos*. Son suelos profundos, moderadamente bien drenados, con un epipedón oscuro, franco-arcillo-limoso a franco-limoso, y un horizonte argílico oscuro, franco-arcillo-limoso a arcillo-limoso, con moteados de hierro-manganeso. Están desarrollados en loess calcáreo, de textura franco-limoso, con concreciones de calcáreo y calcáreo libre hasta 5 %.

El solum varía entre 90-115 cm. El epipedón mólico incluye los horizontes A1 y B1 ó A3 y, ocasionalmente, parte también del B21t. El espesor del A1 es de 08-15 cm, pero cuando se encuentra un horizonte A1 con un B1 ó A3, es de 15-22 cm.

Horizonte	Ap	B21t	B22t	B31	B32	Cca
Profundidad (cm)	03-15	21-33	39-57	65-79	88-100	107-120
Mat. orgánica (%)	2,65	1,53	1,03	0,69	0,47	0,40
C/N	10	8	8	7	6	6

(Fuente: Plan de mapa de suelos, 2000)

### Contantes hídricas del perfil para Serie Tezanos Pintos

Horizonte	Profundidad (cm)	Dap (Mg m <sup>-3</sup> )	CapC (%)	PMP (%)
Ap	0-14	1,33	26,97	14,92
B <sub>21t</sub>	21-35	1,32	35,80	21,69
B <sub>22t</sub>	35-65	1,41	35,36	21,33
B <sub>31</sub>	65-81	1,35	35,82	19,70
B <sub>32</sub>	81-96	1,22	36,69	20,03
C <sub>Ca</sub>	100-120	1,21	30,50	17,54
C <sub>Ca</sub>	120-140	1,26	31,55	17,29
C <sub>Ca</sub>	140-160	1,23	32,71	17,28
C <sub>Ca</sub>	160-180	1,18	33,49	19,10

(Fuente: com. pers. Ing. Agr. Marcelo Wilson, INTA EEA Paraná)

*Dap: densidad aparente*

*CapC: capacidad de campo*

*PMP: punto de marchitez permanente*

**Precipitaciones (PP) acumuladas durante el ciclo de cada grupo de madurez (GM) estudiado, en su respectiva fecha de siembra.**

		PP ciclo soja (mm)	
		GM CC	GM CL
Promedio serie	2000/17	-	-
Campaña 1	2013/14	474	695
Campaña 2	2014/15	696	696
Campaña 3	2016/17	683	770

**Fechas de madurez fisiológica y de la cosecha del trigo y fecha de siembra de la soja, según cada campaña en evaluación.**

Campaña	Mf trigo	Cosecha trigo	Siembra soja
2013/4	12 noviembre	21 noviembre	02 diciembre
2014/5	20 octubre	02 noviembre	29 noviembre
2016/7	15 noviembre	29 noviembre	06 diciembre