



Crear... Crear... Crecer...

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RIO CUARTO**  
**FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA**

“Trabajo Final presentado  
para optar al Grado de Ingeniero Agrónomo”

**EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA EN SOJA DE DIFERENTES  
GRUPOS DE MADUREZ BAJO RIEGO**

**Alumno: Scheurer María Soledad**

**DNI: 34.052.137**

**Director: Cerioni Guillermo**

**Codirector: Kearney Marcelo**

**Río Cuarto – Córdoba**

**2015**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA**

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN**

**Título del trabajo:** RIEGO EN SOJA DE DIFERENTES GRUPOS DE MADUREZ SOBRE LA EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA

**Autor:** Scheurer María Soledad

**DNI:** 34.052.137

**Director:** Ing. Agr. MSc. Cerioni Guillermo

**Codirector:** Kearney Marcelo

**Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias del Jurado Evaluador:**

Dr .Ing. Agr. Esposito Gabriel \_\_\_\_\_

Ing. Agr. Estevez Sergio \_\_\_\_\_

Ing. Agr. MSc. Esposito Gabriel \_\_\_\_\_

**Fecha de Presentación:** \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_ .

**Aprobado por Secretaría Académica:** \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_ .

\_\_\_\_\_  
**Secretario Académico**

## **DEDICATORIA**

A mis dos abuelos, Negro y Julito, que me acompañan desde el cielo y que tanto esperaron este momento.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios: Porque de Él es mi vida.

Por regalarme a mi familia, que me acompañó y me acompaña incondicionalmente en cada paso que doy.

Por ponerme a las personas indicadas en cada momento de esta etapa que me ayudaron a crecer y a ver la vida de una manera diferente. Muchos de ellos mis amigos.

Por haberme presentado a Beto, mi compañero de camino, la persona que llenó de luz mi vida.

## ÍNDICE GENERAL

Certificado de aprobación	II
Dedicatoria	III
Agradecimientos	IV
Índice General	V
Índice de Tablas	VI
Índice de Figuras	VII
Resumen	IX
Summary	X
Introducción	1
Hipótesis	5
Objetivo General	5
Objetivos Específicos	5
Materiales y Métodos	6
• Clima	6
• Suelo	6
• Cultivo	9
• Análisis e interpretación de resultados	9
Resultados y discusión	10
• Condiciones agroclimáticas	10
- Precipitaciones, evapotranspiración y déficit hídricos	10
- Riegos aplicados	11
- Radiación solar	12
- Temperatura media del aire	13
• Características del suelo	13
• Etapas fenológicas y fechas de ocurrencia para cada GM y condición hídrica	14
• Biomasa producida y acumulada	15
• Contenido de agua útil en el suelo	17
• Consumo de agua	20
• Eficiencia del uso del agua	20
• Componentes del rendimiento y producción de granos	23
Conclusiones	28
Bibliografía	29

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Fechas y duración (DDS) de las diferentes etapas fenológicas de los grupos de madurez de soja (III, IV y V) para las situaciones de riego y secano.	14
<b>Tabla 2.</b> Biomasa ( $\text{g/ m}^2$ ) para cada grupo de madurez y condición hídrica de los diferentes componentes (tallo, vainas, semillas, hojas y biomasa total)	15
<b>Tabla 3.</b> Promedio de la EUA para biomasa y rendimiento ( $\text{Kg/ha/mm}$ ) en los grupos de madurez y condición hídrica.	22
<b>Tabla 4.</b> Número de semillas por superficie, peso de 100 semillas y rendimiento en grano para los grupos de madurez (GM), la condición hídrica (CON) y la interacción (GM X CON)	24

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Valores medios decádicos en milímetros de precipitación (PP), evapotranspiración (ETP) y déficit hidrológico de la campaña 2011/12 y de la serie histórica 1974-1993.	10
<b>Figura 2.</b> Radiación global ( $Mj\ m^{-2}$ ) y radiación fotosintéticamente activa mensual durante el ciclo del cultivo para la campaña 2011/12	12
<b>Figura 3.</b> Temperaturas del aire (máxima, media y mínima) de la campaña 2011/12 y de la serie histórica (1977-2006).	13
<b>Figura 4.</b> Biomasa (materia seca acumulada), desde la siembra hasta la madurez del cultivo de los grupos de madurez III, IV y V, para las diferentes condiciones hídricas (riego y seco).	16
<b>Figura 5.</b> Agua útil disponible (%) de 0 a 100 cm de profundidad durante el ciclo del cultivo para las condiciones hídricas riego y seco promedio de los GM III, IV y V.	17
<b>Figura 6.</b> Agua útil disponible (%) de 0 a 100 cm de profundidad durante el ciclo del cultivo para las condiciones hídricas riego y seco del GM III.	18
<b>Figura 7.</b> Agua útil disponible (%) de 0 a 100 cm de profundidad durante el ciclo del cultivo para las condiciones hídricas riego y seco del GM IV.	19
<b>Figura 8.</b> Agua útil disponible (%) de 0 a 100 cm de profundidad durante el ciclo del cultivo para las condiciones hídricas riego y seco del GM V.	19
<b>Figura 9.</b> Dinámica de la evapotranspiración (mm) acumulada durante el ciclo del cultivo para los grupos de madurez III, IV y V bajo condiciones de riego y seco.	20
<b>Figura 10.</b> EUABT y EUARG para los grupos de madurez III, IV y V bajo riego y en seco.	21
<b>Figura 11.</b> Numero de granos por metro cuadrado en R8 para la interacción grupo de madurez*condición hídrica.	25
<b>Figura 12.</b> Peso de 100 granos (g) en R8 para la interacción grupo de madurez*condición	26

hídrica.

**Figura 13.** Rendimiento de granos ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) en R8 para la interacción grupo de madurez\*condición hídrica.

27

## RESUMEN

La disponibilidad de agua es la principal limitante de producción del cultivo de soja en nuestra zona. La ocurrencia de períodos de déficit hídrico más o menos prolongados se constituye en una causa fundamental que explica la variabilidad interanual en los rendimientos. La soja es un cultivo que se destaca por su capacidad de compensación, sin embargo existen en el ciclo momentos de alta sensibilidad llamados período crítico, donde un estrés puede afectar el rendimiento, imposibilitando esta capacidad compensadora. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del riego sobre la eficiencia en el uso del agua (EUA) en cultivares de soja de grupos de madurez III, IV y V. El experimento se realizó en la campaña agrícola 2011/12 en el Campo Experimental de la Facultad de Agronomía y Veterinaria, UNRC (Río Cuarto, Córdoba) y los factores evaluados fueron: grupo de madurez (GM) del cultivar, con 3 niveles (III, IV y V), y la condición hídrica con 2 niveles (secano y riego suplementario). La EUA (biomasa y rendimiento) no varió entre GM, independientemente de la condición hídrica de cada grupo. Esta variable se modificó con la condición hídrica, los tratamientos regados tuvieron mayor EUA respecto a los de secano. La producción de biomasa total se duplicó en el tratamiento bajo regadío respecto del tratamiento secano. El GM mayor tuvo más biomasa, aunque las diferencias se diluyeron hacia el final del ciclo. El rendimiento en grano fue mayor bajo riego respecto del tratamiento de secano. Los GM no presentaron diferencias en el rendimiento. Para la interacción entre factores (GM x CON); bajo riego los GM menores (III y IV) lograron mayor rendimiento que el V; por su parte en la condición de secano esta relación fue inversa. Eso se debió a la oferta de condiciones durante el período crítico. La mayor radiación y temperatura la tuvieron los GM III y IV y lograron expresar su potencial sin limitaciones hídricas, cuando estos materiales fueron expuestos a esas condiciones sin el aporte de riego suplementario tuvieron una mayor caída en el rendimiento que el GM V. Este último fue más estable, pues tuvo menor impacto en el rendimiento bajo ambas condiciones hídricas, debido a que su etapa reproductiva (crítica) coincidió con una mejor oferta ambiental, y lograron eludir el gran déficit hídrico que se presentó. Esta respuesta en el rendimiento tiene alta relación en sus componentes, y dentro de ellos el número de granos más que el peso individual.

## SUMMARY

Water availability is the most important restriction of soybean crops in our area. The essential reason that explains the variation from year to year in crop performance is the occurrence of hydrological deficiency periods more or less prolonged. Soybean is a crop that stands out among others because of its compensation ability, however during the cycle there are high sensibility moments called critical periods where the stress can affect the crop yield preventing this compensation ability. The aim of this assay (research) was to evaluate the irrigation effect on the efficiency of water usage (EUA) in maturity groups III, IV and V of soybean crops. The experiment was carried out during 2011/2012 agricultural campaign in the UNRC experimental field in Río IV, Córdoba; and the measured parameters were: crop maturity group (GM) with three levels (III, IV and V), and water condition with two levels (dryland and supplementary irrigation). The EUA (biomass and crop yield) didn't change between GM, regardless of the water condition in each group. It was observed a modification in this parameter in relation to water condition, the irrigated treatments showed a bigger EUA than the dryland treatments. The total biomass production in the irrigation treatment was duplicated regarding the dryland treatment. More biomass was observed in the older GM even though these differences were wane at the end of the cycle. The irrigation treatment showed a bigger grain yield than the dryland treatment. Crop yield differences weren't observed among the GM. The younger maturity groups III and IV had bigger yield than the maturity group V during GMxCON interactions, on its behalf this relation was opposite in the dryland condition. This result was due to the conditions offered during the critical period. The MG III and IV had the biggest solar radiation and temperature, and they could show their potential without water limitations; but when they had a shortage of supplementary irrigation these groups had a lower yield than the MG V. The last one was more stable because under both water conditions it showed a lower impact in the yield due to its reproductive period (critical) was at the same time that a lower environmental offer and they could avoid the water deficit. This yield response has a high relation between its components, especially the number of grains more than the individual weight.

## INTRODUCCIÓN

La década del setenta marcó el inicio de la soja en el país, incrementándose la superficie sembrada en forma paulatina hasta alcanzar su máximo valor en los últimos años favorecida por los altos precios internacionales, el bajo costo de producción y la aparición de los genotipos mejorados resistentes a glifosato. La producción, entre la década del `70 y `80 creció veintiocho veces a partir de un bajo valor inicial, entre el `80 y `90 un 178% y desde comienzos del `90 hasta 2000/01 un 131% (SAGPyA, 2005).

En Argentina para el año 2009/2010 se obtuvo una superficie sembrada de 18.343.272 ha, cosechándose 18.130.904 ha, con una producción total de 52.677.371 t, y un rendimiento promedio de 2.905 kg ha<sup>-1</sup>. Por su parte, la provincia de Córdoba en el mismo periodo registró una superficie implantada de 5.128.640 ha, de las que se cosecharon 5.033.690, con una producción total de 12.993.225 t y un rendimiento promedio de 2.581 kg ha<sup>-1</sup>. Como consecuencia, la soja es hoy el cultivo más importante del país y, sus derivados, el principal producto de exportación argentino (SIIA, 2011).

Con relación a otros cultivos extensivos, la superficie sembrada de trigo y maíz prácticamente no varió en los últimos 30 años en comparación con el área destinada a soja (Salinas y Martellotto, 2012).

En Argentina se cultivan mayoritariamente cultivares de los grupos de madurez (GM) II y III al norte de la Patagonia o al sur de Buenos Aires, los GM IV y V predominan en casi toda la región Pampeana y los GM VI al IX están difundidos en el NOA y NEA (Salado Navarro, 2012)

La disponibilidad de agua es la principal limitante del rendimiento del cultivo al sur de la provincia de Córdoba. La ocurrencia de períodos de déficit hídrico más o menos prolongados se constituye en una causa fundamental que explica la variabilidad interanual en los rendimientos. La magnitud de estas deficiencias está estrechamente relacionada con la capacidad de almacenaje de agua de los suelos y el volumen explorado por las raíces (Bobrero *et al.*, 2002).

Para la región sojera núcleo, las necesidades de agua de los cultivos de soja de primera varían de 500 a 600 mm. Las variaciones en dichas cantidades dependen de la demanda atmosférica, la duración del ciclo del cultivo y del área foliar desarrollada por el mismo (Andriani *et al.*, 1991).

El balance hídrico de la zona indica un período negativo en época estival (Seiler *et al.*, 1995), que puede ser muy perjudicial para el rendimiento del cultivo en caso de coincidir con el período crítico del mismo.

La soja es un cultivo que se destaca por su capacidad de compensación, sin embargo existen en el ciclo momentos de alta sensibilidad llamados períodos críticos, donde un estrés puede afectar el rendimiento, limitando esta capacidad compensadora. Durante el ciclo del cultivo se pueden identificar dos momentos críticos, el primero es en emergencia donde se determina el número de plantas (y su distribución espacial), y otro muy importante que tiene una mayor duración y es la etapa que se concentra alrededor del llenado de granos (Salinas y Martellotto, 2012).

Este período crítico se inicia alrededor de  $R_3$ - $R_4$  y se extiende hasta  $R_6$ , siendo el subperíodo comprendido entre  $R_{4,5}$  y  $R_{5,5}$  esencialmente crítico (Sadras *et al.*, 2002). Si bien la soja se comporta como relativamente tolerante al déficit de agua durante el período vegetativo y el de maduración, se encuentran respuestas en varios estadios fenológicos afectando distintos procesos fisiológicos. Así, Leopold (1983) señala que con la disminución del contenido de agua en el suelo, primero se reduce la velocidad de germinación y cuando la restricción es más severa se reduce el porcentaje de germinación, disminuyendo la población de plantas establecidas.

Una deficiencia de agua durante los estadios de desarrollo vegetativo reduce la tasa de crecimiento de la planta. La expansión foliar disminuye rápidamente a medida que el potencial agua de la hoja decrece. Cuando el estrés hídrico es suficiente como para reducir la fotosíntesis, también disminuye la fijación del nitrógeno. Los efectos del estrés hídrico sobre el crecimiento vegetativo se manifiestan en hojas de tamaño menor, tallos de diámetro reducido y plantas más bajas (Norman, 1983).

La deficiencia hídrica también afecta la fijación de nitrógeno, ya que el nódulo debe tener más del 80% de peso fresco del tejido totalmente turgente para que no se afecte la capacidad de reducir N atmosférico (Peticari *et al.*, 2003).

Salinas *et al.*, (1996) encontraron una disminución del peso de 100 granos en cultivares sometidos a deficiencias hídricas en un periodo avanzado del llenado de granos. Describiendo claras evidencias de senescencia foliar en la mayoría de las hojas aún presentes en el estadio  $R_6$ . Egli (1998), describió que las disminuciones del peso de granos causada por deficiencias hídricas están más frecuentemente asociadas a un acortamiento del período de llenado que a cambios evidentes en la tasa de crecimiento de los granos.

El agua que ingresa al sistema de producción puede provenir de las precipitaciones, el riego, la napa freática y por escorrentía superficial (desde áreas más elevadas). Los egresos se producen por evaporación del agua desde la superficie del suelo, la transpiración del cultivo, la escorrentía hacia áreas más bajas y el drenaje por debajo de la zona explorada por las raíces (percolación profunda).

Teniendo en cuenta estos flujos, es posible realizar un balance de agua. Si los ingresos superan a los egresos, toda o parte del agua excedente puede acumularse en el perfil del suelo explorado por el cultivo, generando de esta manera una variación de almacenaje positiva. En caso contrario, la variación de almacenaje, será negativa (Dardanelli *et al.*, 2003).

Una vez que el agua ha penetrado en el suelo y se almacena, la principal preocupación pasa a ser el uso eficaz de la misma (Scott y Aldrich, 1975).

En general, y para la mayoría de los suelos, las plantas pueden usar aproximadamente la primera mitad del agua disponible en el suelo sin sufrir estrés hídrico. A partir de ese umbral el cultivo puede manifestar algún grado de estrés creciente, dependiendo del estado de desarrollo del cultivo y la condición climática. En términos generales, se puede afirmar que el consumo de agua y el crecimiento de los cultivos se reducen cuando el contenido hídrico del suelo en la zona explorada por las raíces se encuentra por debajo del 40-60% del agua útil (Salinas y Martellotto, 2012)

Las respuestas al estrés hídrico pueden ser cuantificadas a través de la eficiencia en el uso del agua (EUA), que hace referencia a la relación entre la producción de materia seca (MS) o el rendimiento en granos con la evapotranspiración (ET). Dicho de otra manera, es la biomasa producida por unidad de agua consumida. La acumulación de biomasa puede expresarse en asimilación de CO<sub>2</sub>, biomasa total de la planta o el cultivo, o rendimiento en grano; mientras que el agua consumida se expresa como transpiración, evapotranspiración o agua que ingresa al sistema (Dardanelli *et al.*, 2003).

Debido a la dependencia que la EUA tiene respecto de la condición climática y de manejo del cultivo, la bibliografía muestra un amplio rango de valores para cultivos con adecuada disponibilidad de agua. Para la soja se han hallado datos entre 5-6 a 11 kg ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>. En Balcarce, la EUA en soja fue de 26,7 kg MS aérea ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup> y 9,1 kg de grano ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>. La EUA también varía entre especies, según el tipo de metabolismo (C3 vs C4) que posean, la composición química de la biomasa, las características de uso de agua, y entre climas que condicionan la demanda atmosférica. Es decir, la EUA es modificada por todas aquellas variables que afectan el rendimiento del cultivo y/o el consumo de agua del mismo (Della Magiora *et al.*, 2002).

Una característica que diferencia a los distintos cultivos es la capacidad que tienen de explorar el suelo en profundidad, esto les permite potencialmente (si no existen otras limitantes) disponer de mayor cantidad de agua y, según su tasa de crecimiento, tenerla en menor tiempo. Las raíces de la planta de soja alcanzan su máxima profundidad aproximadamente en el estadio R5, a partir de este momento son los granos los únicos que continúan incrementando su materia seca. Otro atributo a considerar en el proceso de captación de agua por las raíces, es la tasa de extracción, que se define como la máxima fracción de agua útil que se puede extraer en un día (mm de agua por

mm de suelo y por día). Este valor será máximo cuando no existan limitantes para la distribución uniforme de las raíces y se haya alcanzado una densidad crítica de las mismas (Salinas y Martellotto, 2012).

En zonas secas o cuando se dispone de poca agua para riego, los cultivares de maduración temprana pueden comportarse mejor que los de maduración tardía. El uso de un cultivar precoz, proporciona cierta protección contra el fracaso total de la cosecha por sequía, pero esto se hace a costa de perder la posibilidad de un rendimiento máximo en el caso de que la humedad después sea favorable.

El estudio de estos temas es de suma importancia, ya que por lo general, se conoce el agua que hay disponible en el suelo, pero se sabe que con esto no alcanza. Como se mencionó anteriormente, es indispensable saber cómo la planta captura el agua y que aprovechamiento hará de la misma para producir biomasa y por ende rendimiento (Norman, 1983).

## **HIPÓTESIS**

La eficiencia en el uso del agua (EUA) de la soja varía entre cultivares de grupos de madurez diferente y según las condiciones hídricas a las que se exponen los mismos durante su ciclo.

## **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el efecto de la condición hídrica sobre la eficiencia en el uso del agua (EUA) de cultivares de soja de grupos de madurez III, IV y V en Río Cuarto (Córdoba).

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ❖ Evaluar los efectos de condiciones hídricas de secano y riego sobre el rendimiento en grano y sus componentes en distintos cultivares de soja.
- ❖ Determinar y evaluar la eficiencia del uso de agua (EUA) de esos genotipos en ambas condiciones.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El sitio donde se realizó el estudio se encuentra ubicado en el campo experimental de la Facultad de Agronomía y Veterinaria UNRC (33° 07' de latitud sur, 64° 14' de longitud oeste de G. y a una altitud de 421 msnm) en un suelo Hapludol típico de textura franca arenosa fina.

En dicha área se sembraron, el 2 de noviembre de 2011, tres cultivares de soja de los grupos de madurez (GM) III, IV y V con una densidad de 30 plantas.m<sup>-2</sup> en surcos a 0,52 m. A su vez, cada cultivar fue asignado a una parcela con riego y a otra en condiciones de secano.

Los genotipos seleccionados como representativos de cada GM fueron: Tj 2137 (III), Tj 2146 (IV) y NA 5509 (V).

El diseño experimental utilizado fue un factorial asignado a bloques al azar con tres repeticiones. Los factores fueron: la condición hídrica con dos niveles: riego y secano; y el otro factor el grupo de madurez con tres niveles III, IV y V.

El método de riego fue por aspersión con un equipo de avance frontal y una frecuencia que permitiese mantener el contenido de agua útil del suelo por encima del 50% de su capacidad de almacenaje. Para ello, se monitoreó el balance semanal entre las lluvias y la evapotranspiración a partir de los datos obtenidos de una estación agrometeorológica instalada en el predio experimental.

Se implementaron prácticas de manejo para mantener al cultivo libre de malezas, plagas y enfermedades y no afectar las variables en estudio.

### **Observaciones y mediciones realizadas durante el estudio**

#### *Del clima:*

Se registraron los datos diarios de precipitaciones (mm), temperatura del aire (máxima, mínima y media en abrigo meteorológico, °C), radiación incidente (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>) y evapotranspiración potencial (ET<sub>o</sub>), de la Estación Agrometeorológica instalada en el Área Experimental de la Facultad de Agronomía y Veterinaria (UNRC), ubicada en cercanías del ensayo experimental.

#### *Del suelo:*

Contenido de humedad: Se midió regularmente cada 10-15 días, entre la emergencia y la madurez fisiológica del cultivo. Se usó el método gravimétrico, donde la masa de agua surge de la diferencia entre la masa total del suelo húmedo y la masa de suelo seco obtenida en estufa durante 24 hs a 105 °C.

El procedimiento fue:

- 1- Toma de la muestra de suelo cada 20 cm hasta el metro de profundidad (zona radical).
- 2- Pesaje de la muestra húmeda ( $PH+T$ )
- 3- Secado en estufa a 105 °C hasta peso constante
- 4- Pesado de la muestra seca ( $PS+T$ )
- 5- Cálculo del contenido de humedad mediante las siguientes ecuaciones:

$$CGA(g.g^{-1}) = \frac{(PH + T) - (PS + T)}{PS + T}$$

Dónde:

CGA= contenido gravimétrico de agua ( $g.g^{-1}$ )

PH= peso de la muestra de suelo húmedo (g)

PS= peso de la muestra de suelo seco (g)

T= tara del recipiente de aluminio (g)

Con los datos de humedad gravimétrica y densidad aparente (DAP) de cada capa del suelo se calculó la humedad volumétrica según la siguiente ecuación.

$$HV = HG \times DAP$$

Dónde:

HV= humedad volumétrica ( $cm^3 cm^{-3}$ )

HG= humedad gravimétrica ( $g g^{-1}$ )

DAP= densidad aparente del suelo ( $g cm^{-3}$ )

La lámina de agua total (mm) para cada capa de suelo se obtuvo mediante el producto de la HV ( $cm^3$  de agua  $cm^{-3}$  de suelo) y el espesor de la misma (expresado en mm). Luego se calculó la lámina de agua útil para las plantas, definida como aquella que se encuentra retenida entre -0,03 y -1,5 MPa (capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), respectivamente). De la sumatoria de la lámina de agua útil de cada intervalo de medición (0,20 m) se obtuvo el agua útil del suelo de 0 a 100 cm de profundidad.

*Cálculo del consumo acumulado de agua útil en el suelo:*

El balance decádico expresado en términos de agotamiento del agua en el suelo al final de cada década es:

$$Dri = Dri_{-1} - Pi - Ri + ETci + Ppi$$

Dónde:

Dri= Agotamiento al final de la década i (mm)

Dri<sub>-1</sub>: Agotamiento al final de la década i<sub>-1</sub> (mm)

Pi= precipitación efectiva de la década i (mm)

Ri= riego de la década i (mm)

ETci= evapotranspiración del cultivo en la década i (mm)

Ppi= percolación profunda en la década i (mm)

El riego (Ri) se realizó con un equipo de avance frontal de 87,6 m de longitud de trabajo, la distribución del agua fue por medio de tuberías de bajada y emisión mediante difusores con reguladores de presión. El agua, de muy buena calidad para riego, proviene de una perforación ubicada en el mismo Campo Experimental.

Los mismos fueron de aproximadamente 70 mm cada uno, y se aplicaron dos en el mes de diciembre (23 y 31), dos en enero (6 y 17) y uno en febrero (1). En la condición de secano, y debido a la sequía extrema ocurrida en los meses de diciembre y enero, se decidió aplicar un riego el día 17 de enero de 2012 con la finalidad de asegurar la continuidad del cultivo.

La ETc se obtuvo mediante la ecuación propuesta por Allen *et al.* (1998):

$$ETc = ETo \times Kc \times Ks$$

Dónde:

ETc= evapotranspiración del cultivo (mm/semana)

ETo= evapotranspiración de referencia (mm/semana)

Kc= coeficiente de cultivo (Allen *et al.*, 1998)

Ks= coeficiente de estrés (Allen *et al.*, 1998)

La percolación profunda (Pp) se consideró cuando la lámina de agua del suelo hasta 1 m de profundidad superó la lámina estimada al punto de capacidad de campo.

*Del cultivo:*

Se registraron las etapas fenológicas y fechas de ocurrencia para cada GM y condición hídrica (CH) utilizando la clave fenológica de Fehr y Caviness (1977). Las mismas se consideraron cumplidas cuando el 50% o más de las plantas de cada parcela estaban en la respectiva etapa.

*Estimación de la biomasa o materia seca (MS):* En el estadio R8 se tomaron muestras de todas las plantas presentes en un metro lineal (0,52 m<sup>2</sup>) por tratamiento y repetición. Posteriormente, en laboratorio, se separaron por órganos componentes (hojas, tallos, frutos y semillas) y se sometieron a secado en estufa con circulación forzada de aire hasta peso constante, para luego ser pesados.

En función a la biomasa producida y el rendimiento del cultivo se estimó la EUA mediante la siguiente ecuación:

$$EUA = \frac{Y}{ETc}$$

Dónde:

EUA= eficiencia de uso del agua de biomasa y grano (kg m<sup>-3</sup>)

Y= rendimiento de biomasa y grano del cultivo (kg m<sup>-2</sup>)

ETc= evapotranspiración acumulada del cultivo (m)

*Componentes del rendimiento y producción de granos:*

En la etapa fenológica R8, (madurez de cosecha) se recolectaron 5 muestras de 1 m<sup>2</sup> por tratamiento y repetición. Posteriormente en laboratorio, se midieron los componentes del rendimiento: número y peso de granos y a partir de ellos el rendimiento en granos.

**Análisis e interpretación de los resultados.**

Las variables evaluadas fueron sometidas a ANOVA y los promedios se compararon mediante test de Duncan ( $\alpha=0,05$ ). Se calcularon regresiones lineales entre el agua, biomasa y el rendimiento con el programa estadístico Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2011).

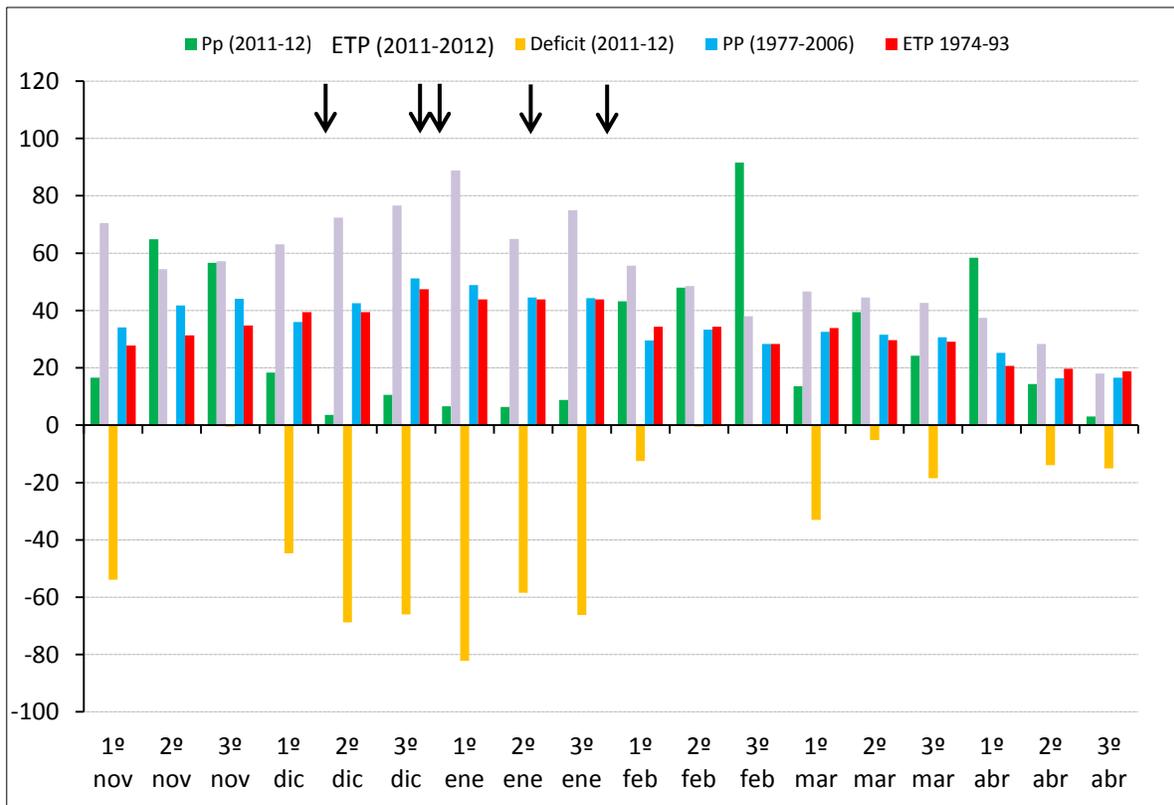
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Condiciones agroclimáticas

Las condiciones climáticas de la campaña 2011/12 y de la serie histórica (1977-2006) se presentan en la figura 1 con valores medios decádicos de: precipitación (Pp), evapotranspiración potencial (ETP), déficit hídricos; la radiación solar global y temperatura del aire mínima, máxima y media.

#### *Precipitaciones, evapotranspiración y déficit hidrológicos:*

Las precipitaciones de esta región (Río Cuarto) presentan un régimen monzónico, 800 mm anuales de precipitación, con una media acumulada histórica (1977-2006) de 665 mm para los meses del ciclo del cultivo (Nov-Abril).



**Figura 1.** Valores medios decádicos en milímetros de precipitación (PP), evapotranspiración (ETP) y déficit hidrológico de la campaña 2011/12 y de la serie histórica 1974-1993. Las flechas negras indican los momentos de los riegos aplicados.

La campaña 2011/12 presentó dos meses con marcados déficits hidrológicos, siguiendo un patrón de año Niña y un promedio acumulado de 526 mm para el ciclo del cultivo.

La lluvia de la campaña (2011/12) en noviembre (fecha de siembra) presentó un valor medio mensual acumulado de 138 mm respecto a la media histórica mensual de 120 mm, con 16,6 mm en la primera década del mes, 64,8 en la segunda y 56,6 en la tercera. Los meses de diciembre y enero tuvieron un aporte mínimo de lluvias (32 y 22 mm, respectivamente), con valores muy bajos respecto a la media histórica mensual de 137 y 91 mm, respectivamente y un marcado ascenso de las altas temperaturas (ver Figura 3) que produjo una gran demanda evaporativa. La primera década de diciembre tuvo valores de 18,4 mm, la segunda 3,6 mm y 10,6 mm la última. Respecto a enero hubo precipitaciones de 6,6, 6,4 y 8,8 mm en las tres décadas del mes, respectivamente.

El mes de febrero duplicó los valores de precipitación (182 mm) de la media histórica mensual, con 43,2 mm en la primera década, 48 en la segunda y 91,6 en la tercera. En los meses de marzo y abril los valores mensuales fueron similares a la media histórica, presentando en la primera década de marzo 13,6, 39,4 en la segunda y 24,2 mm en la tercera, respectivamente. Por último, los valores de abril fueron 58,4, 14,4 y 3 mm en la primera, segunda y tercera década, respectivamente.

Observando la figura 1, se puede distinguir claramente que la evapotranspiración ocurrida en cada mes de la campaña 2011/12 fue superior respecto a la media histórica, destacándose diciembre y enero con la mayor diferencia. Esto, como ya se mencionó debido a las altas temperaturas ocurridas en esos meses.

#### *Riegos aplicados:*

El riego suplementario permite realizar la siembra en el momento óptimo y minimiza la desuniformidad de germinación y emergencia del cultivo, como así también asegura la humedad del suelo necesaria para el proceso de nodulación que permitirá mejorar la futura nutrición nitrogenada del cultivo.

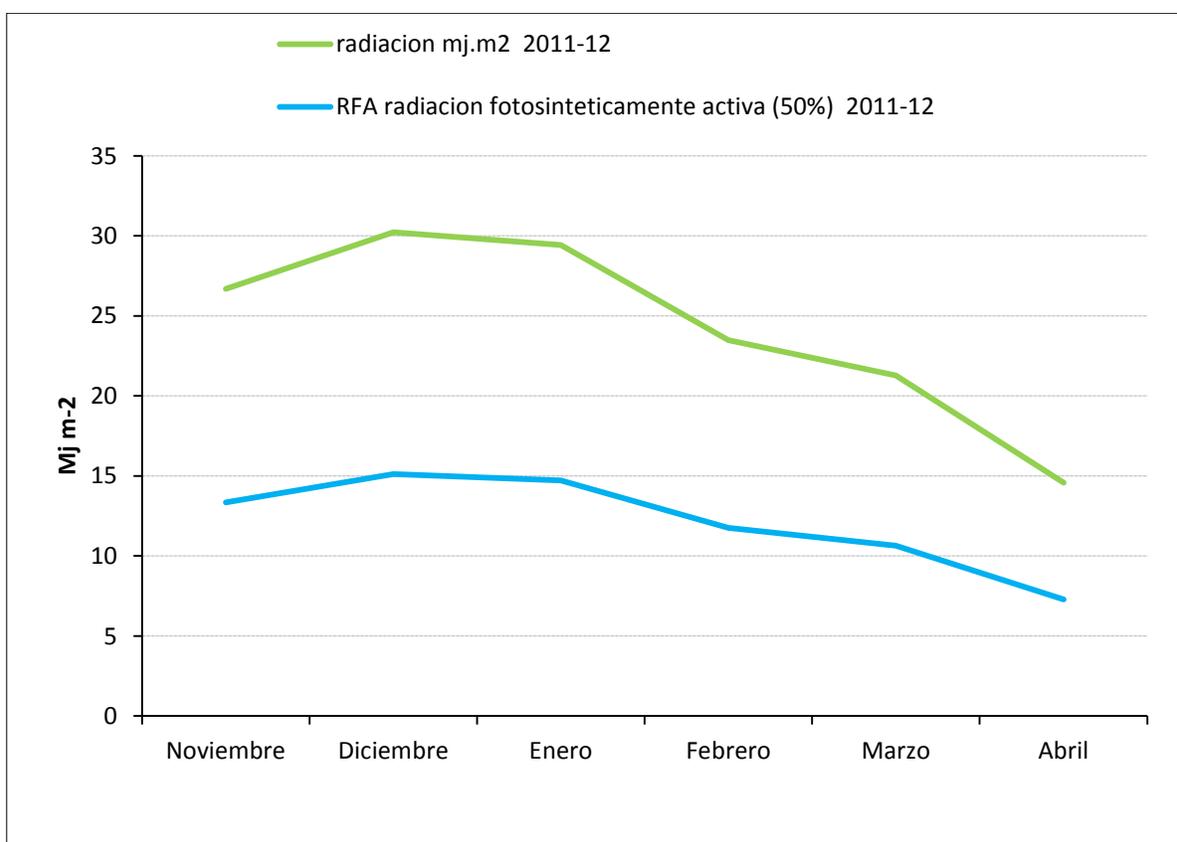
Después de la implantación y comienzo de la nodulación, el cultivo pasa por un periodo de menor susceptibilidad frente a episodios de sequía, solamente durante el cual se debe lograr una cobertura total del suelo, y plena intercepción de la radiación. El otro período donde el riego suplementario puede ser importante para asegurar la producción es R4-R5 (Salinas y Martellotto, 2012).

En base a los datos de Pp y ETP para los meses del ciclo del cultivo de la campaña 2011/12, y del contenido gravimétrico de agua del suelo, se realizaron riegos para aminorar el déficit hídrico.

### Radiación solar:

La soja por ser una especie clasificada fotosintéticamente como C3, es menos eficiente para utilizar la radiación solar que las plantas C4, como maíz y sorgo, cuyo aparato fotosintético es diferente. En consecuencia, las hojas de la soja alcanzan el nivel de saturación de luz a menores niveles que las C4 (Salado Navarro, 2012).

En la figura 2 se muestra la radiación solar global para los meses del estudio en  $\text{Mj m}^{-2}$  y la radiación fotosintéticamente activa (RFA) estimada como un 50% de la radiación solar global. Se observa el aumento hacia el mes de diciembre con un pico máximo de radiación entre mediados de ese mes y mediados de enero, y luego una disminución hacia los meses de marzo y abril.



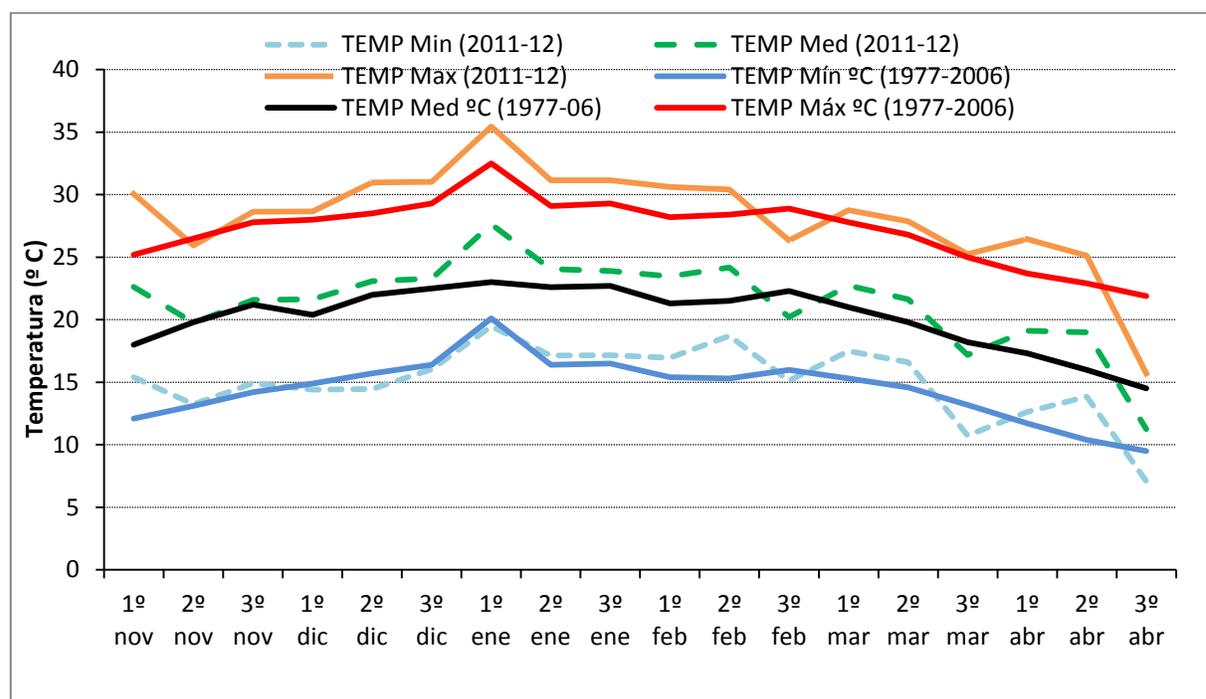
**Figura 2.** Radiación global ( $\text{Mj m}^{-2}$ ) (línea verde) y radiación fotosintéticamente activa (RFA) (línea azul) mensual durante el ciclo del cultivo para la campaña 2011/12.

### Temperatura media del aire:

La marcha de la temperatura a lo largo del ciclo del cultivo se presenta en la figura 3, donde se observa un aumento desde noviembre, con un pico importante entre fines de diciembre y la 1<sup>o</sup>-2<sup>o</sup> década de enero y, a partir de allí, la temperatura va disminuyendo hasta abril. Las temperaturas mínima, media y máxima promedio de la última década de diciembre fueron de 16,03, 23,3, 31,02 °C, respectivamente, siendo superados dichos valores con 19,47, 27,63 y 35,45 °C en la primer década del mes de enero, respectivamente.

Cabe mencionar que la máxima radiación fue en diciembre y la temperatura máxima esta desplazada hacia el mes de enero.

Las temperaturas medias y máximas estuvieron, en general, por encima de los valores medios históricos.



**Figura 3.** Temperaturas del aire (máxima, media y mínima) de la campaña 2011/12 y de la serie histórica (1977-2006). Valores medios decádicos en C.

### Características del suelo donde se realizó ensayo:

El suelo corresponde a un Haplustol tpico de textura franca arenosa fina, profundo y bien drenado. A modo de referencia, los datos de los análisis de suelo realizados antes de la siembra

(D'Adan, 2014), indicaron en promedio para las capas de 0-20 y 20-40 cm de espesor valores de 1,80 % MO, N-NO<sub>3</sub> 21,15 ppm en promedio de ambos espesores y 25 ppm de fósforo de 0-20 cm.

Según Moscatelli (2008), en un alto porcentaje de la superficie productiva de Argentina, representada en una importante magnitud por la región pampeana, dominan los suelos del orden Molisol que poseen la mejor aptitud para la agricultura.

Por otro lado, Andriani (1996), remarca la importancia del suelo y sostiene que es el sustento principal donde el cultivo encuentra parte de los nutrientes que necesitan para crecer, el medio donde se desarrollan las raíces, y el lugar donde se almacena el agua. Según sus características físicas (textura y estructura) y de manejo (siembra directa, rotación de cultivos, entre otras), será la capacidad que tengan dichos suelos de almacenar y proveer de la misma a los cultivos (Salinas y Martellotto, 2012).

*Etapas fenológicas para cada GM y condición hídrica:*

En la tabla 1 se puede observar las etapas fenológicas S, V6, R1, R3, R5 y R7 con sus respectivas fechas de ocurrencia para cada grupo de madurez y condición hídrica. Si se comparan los tres GM en cada etapa fenológica mencionada, se observa que de S a V6 hubo 33 días en todos los casos; a R1, 42 DDS para el GM III y 47 días para los GM IV y V. A R3, el GM III y IV presentaron 68 DDS, mientras que el GM V, 85 días en ambas condiciones hídricas. Al estadio fenológico R5, los GM III y IV llegaron a los 82 DDS y el GM V a los 98 días tanto en secano como bajo riego.

Por último, la duración total del ciclo de los tres GM, de siembra a R7 fue de 114 y 119 días para el GM III y IV en riego y secano. En el caso del GM V hubo diferencias según la condición hídrica, llegando a R7 a los 144 días bajo riego y 138 días en secano.

**Tabla 1.** Fechas y duración (DDS) de las etapas fenológicas de los grupos de madurez de soja (III, IV y V) para las situaciones de riego y secano:

Etapa /GM	III Riego y Secano		IV Riego y Secano		V Riego		V Secano	
	Fecha	DDS	Fecha	DDS	Fecha	DDS	Fecha	DDS
<b>S</b>	02/11/2011	0	02/11/2011	0	02/11/2011	0	02/11/2011	0
<b>V6</b>	05/12/2011	33	05/12/2011	33	05/12/2011	33	05/12/2011	33
<b>R1</b>	14/12/2012	42	19/12/2011	47	19/12/2011	47	19/12/2011	47
<b>R3</b>	09/01/2012	68	09/01/2012	68	26/01/2012	85	26/01/2012	85
<b>R5</b>	23/01/2012	82	23/01/2012	82	08/02/2012	98	08/02/2012	98
<b>R7</b>	24/02/2012	114	29/02/2012	119	26/03/2012	144	20/03/2012	138

La escala utilizada para identificar las diferentes etapas fenológicas del cultivo fue la de Fehr y Caviness (1977). Esta escala propone una descripción de la morfología del cultivo, cuya validez es independiente del cultivar utilizado o de las condiciones generales del cultivo. Ya que toma en cuenta los cambios morfológicos ocurridos en el tallo principal del 50% de las plantas del cultivo. En los estados vegetativos se describe la sucesiva aparición de hojas, teniendo en cuenta el número de nudos que presentan hojas totalmente desarrolladas. Los estados reproductivos están basados en la floración, el desarrollo de vainas, el desarrollo de las semillas y la maduración. (Kantolie *et al.*, 2003).

*Biomasa producida y acumulada:*

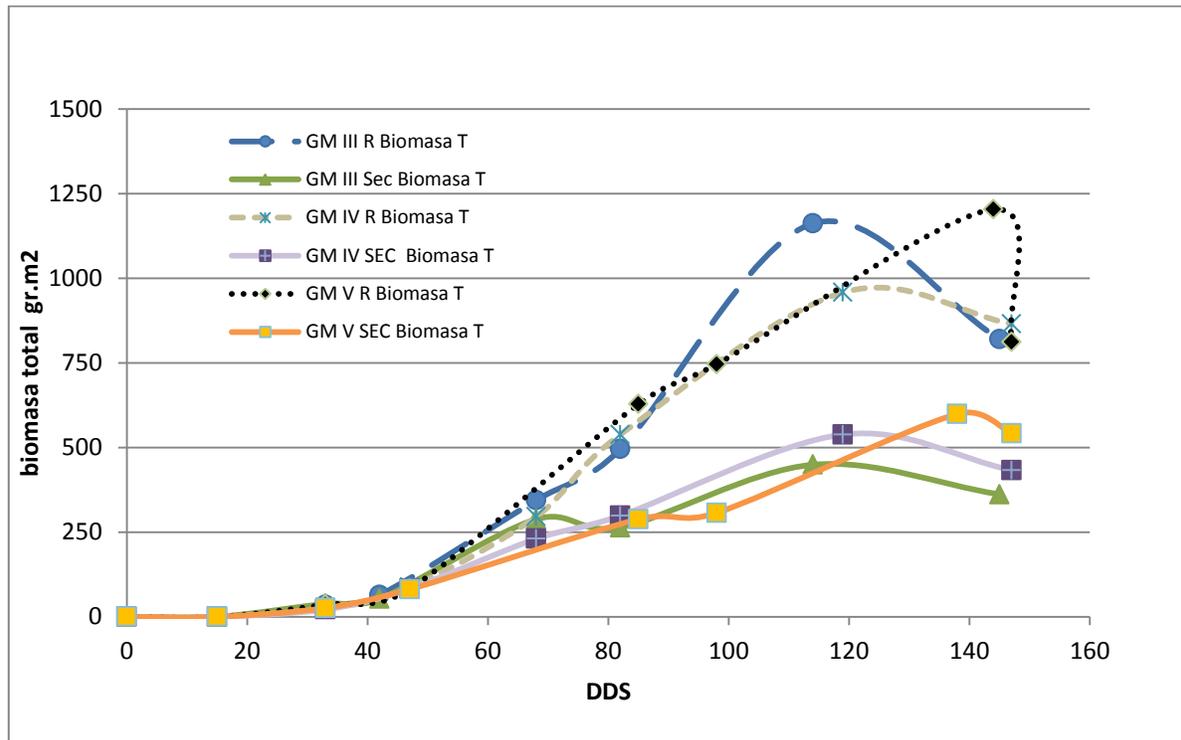
En la Tabla 2 se presentan los valores de biomasa y sus componentes (tallo, vainas, semillas, hojas y biomasa total) ( $\text{g m}^{-2}$ ) para cada GM y condición hídrica.

**Tabla 2.** Biomasa ( $\text{g m}^{-2}$ ) para GM y condición hídrica de los diferentes componentes (tallo, vainas, semillas, hojas y biomasa total)

Cultivar	Biomasa ( $\text{g/m}^2$ )				
	$B_{\text{tallo}}$	$B_{\text{vainas}}$	$B_{\text{semillas}}$	$B_{\text{hojas}}$	BT
GM IIIs	116,1	69,3	176,3	121,8	483,4
GM IIIr	194,6	138,9	487,3	214,6	1035,4
GM IVs	134,5	89,8	209,0	109,0	542,1
GM IVr	211,2	167,0	487,3	193,5	1058,9
GM Vs	126,6	122,8	292,5	118,3	660,2
GM Vr	253,0	147,8	410,7	170,1	981,6

En la figura 4 se pueden observar las curvas de los 6 tratamientos diferentes (GM III; IV y V con riego y GM III, IV y V en seco) visualizando la producción de biomasa total durante el ciclo del cultivo comparando en una primera instancia que el tratamiento con riego superó ampliamente al tratamiento seco llegando a duplicar los valores de biomasa total producidos.

Por otro lado, dentro del mismo tratamiento los diferentes grupos de madurez se comportaron de manera similar dentro de los parámetros generales. Se observa que el GM V (en los dos tratamientos) llegó a la mayor producción de biomasa más tarde que los GM IV y III.



**Figura 4.** Biomasa (materia seca acumulada), desde la siembra hasta la madurez del cultivo de los grupos de madurez III, IV y V, para las diferentes condiciones hídricas (riego y secano).

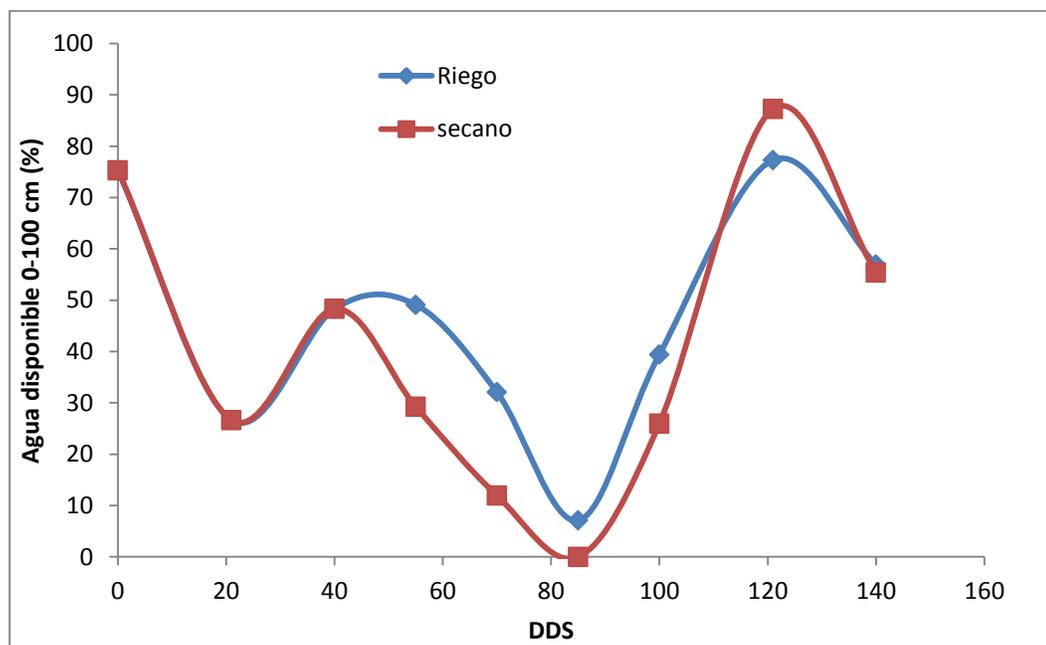
Andrade *et al.*, (2009) encontraron que la producción de materia seca aérea fue de  $12 \text{ t ha}^{-1}$  ( $1.200 \text{ g m}^{-2}$ ) para soja y que valores similares se encuentran en la literatura (Cox y Jolliff, 1986) conducidos bajo riego. Dicho valor es similar a los obtenidos en esta investigación en el tratamiento sin limitaciones hídricas.

Por otro lado Cárcova *et al.*, (2003) muestran un rango de valores de producción de biomasa aérea para soja de  $546\text{-}1.088 \text{ g m}^{-2}$ , valores similares a los obtenidos en el ensayo.

### Contenido de agua útil en el suelo

Técnicamente se denomina “agua útil”, al agua que está almacenada en el suelo y es aprovechada por los cultivos. En general, y para la mayoría de los suelos, las plantas pueden usar aproximadamente la primera mitad del agua disponible sin sufrir estrés hídrico, pudiendo con el 50% restante acusar algún grado de estrés creciente dependiendo del estado del cultivo y la condición climática (Salinas y Mantelotto, 2012).

En la figura 5 se observa la variación durante el ciclo del cultivo del agua útil disponible en las dos condiciones hídricas.



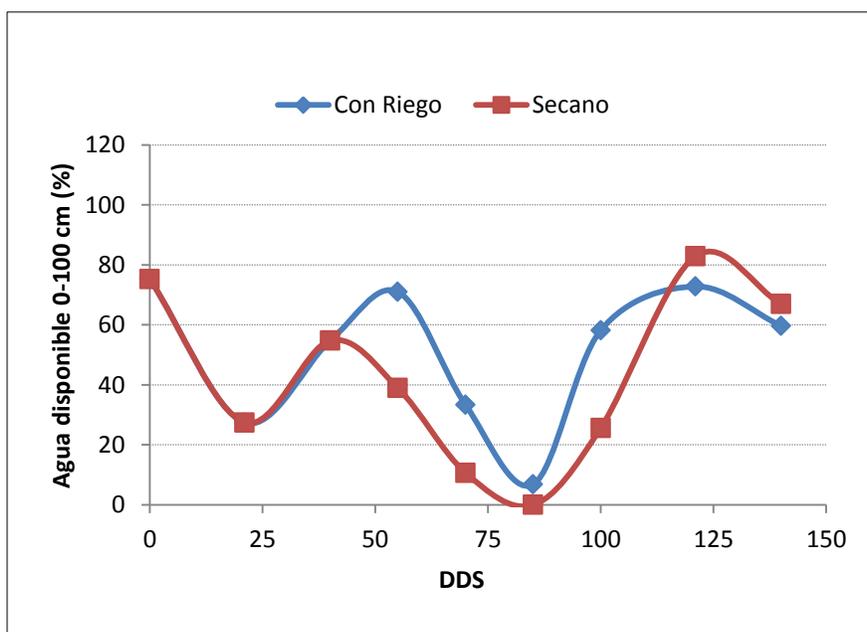
**Figura 5.** Agua útil disponible (%) de 0 a 100 cm de profundidad durante el ciclo del cultivo para las condiciones hídricas riego y seco promedio de los GM III, IV y V.

Las figuras 6, 7 y 8 muestran la evolución del contenido de agua útil disponible en los primeros 100 cm del suelo durante el ciclo del cultivo. Se observa, en los primeros días después de la siembra (DDS), un mayor contenido de agua útil disponible atribuible a que la siembra se hizo en una fecha en la había humedad adecuada debido a la ocurrencia de precipitaciones que permitió una recarga del perfil del suelo y a que la demanda del cultivo en las primeras etapas del desarrollo es baja comparada con estadios más avanzados.

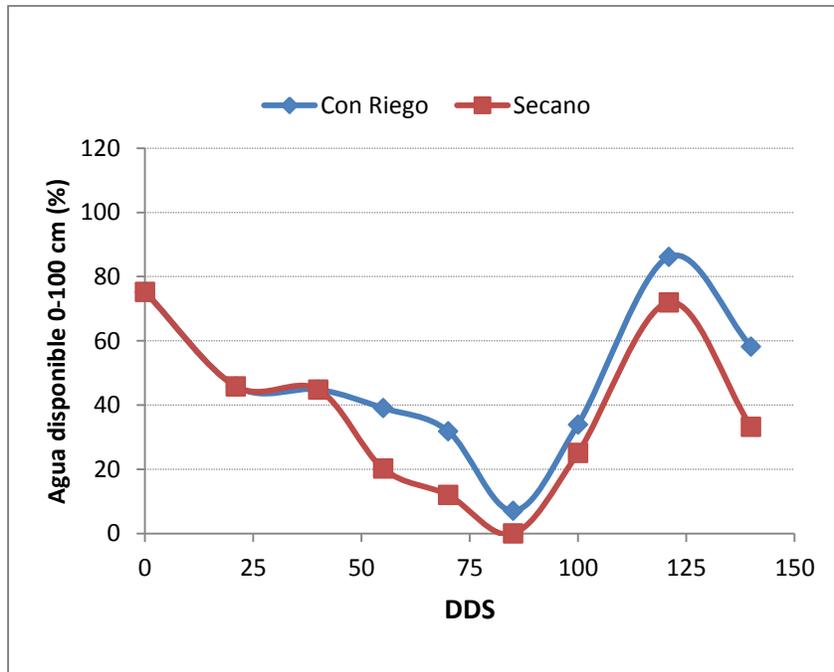
A partir de los 40-50 DDS comienza, en los tres grupos de madurez (III, IV y V), una disminución importante del contenido de agua útil disponible debido a la escasez de precipitaciones desde este momento y hasta los 100-120 DDS, cuando se retomaron las lluvias normalmente, incluso excesivas en muchos casos, recuperándose así al final del ciclo del cultivo. Por lo tanto, se presentaron distintas condiciones hídricas durante el ciclo del cultivo.

Se observa que el menor contenido de agua útil disponible se encuentra en el mes de enero, donde las precipitaciones fueron mínimas, comparadas con el promedio histórico de dicho mes, esto se puede observar en la figura 1. Además las temperaturas mínimas, máximas y medias del mes superaron también el promedio histórico (figura 3). Las altas temperaturas, acompañadas de la situación hídrica deficitaria en el mes de enero explican el bajo contenido de agua útil disponible en el perfil del suelo a través de pérdidas por evapotranspiración.

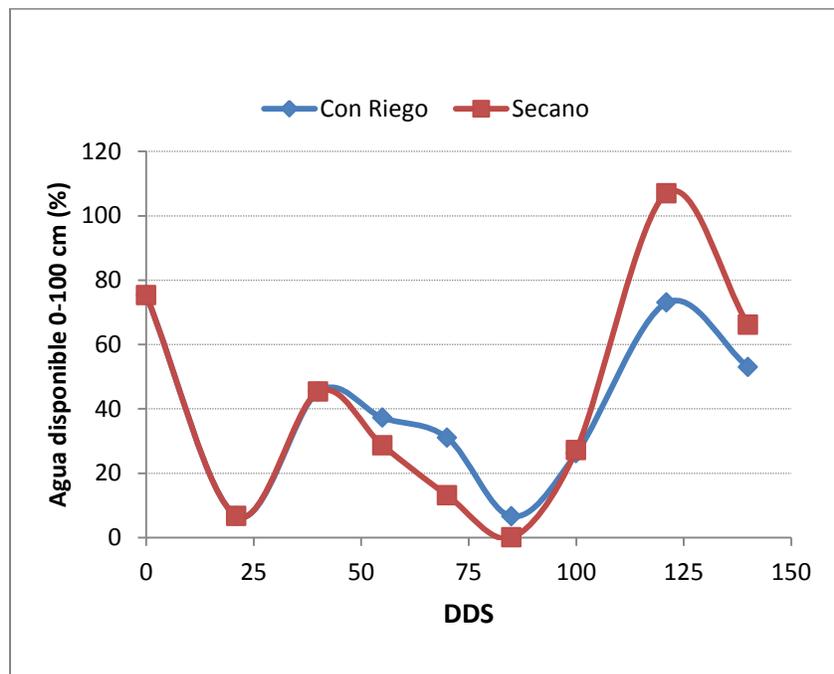
Los requerimientos de agua varían entre especies, entre cultivares, a lo largo de la estación de crecimiento y entre ambientes (Andrade *et al.*, 2009). Esta afirmación explica las diferencias que hay en el contenido de agua útil tanto en secano como bajo riego entre los diferentes grupos de madurez utilizados en el ensayo.



**Figura 6.** Agua útil disponible (%) de 0 a 100 cm de profundidad durante el ciclo del cultivo para las condiciones hídricas de riego y secano del GM III.



**Figura 7.** Agua útil disponible (%) de 0 a 100 cm de profundidad durante el ciclo del cultivo para las condiciones hídricas riego y secano del GM IV.

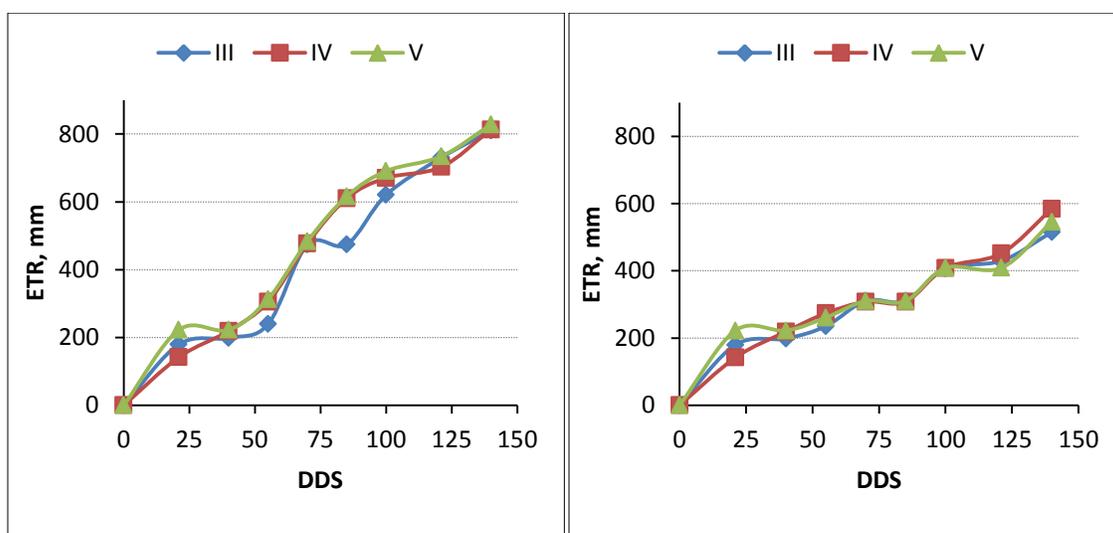


**Figura 8.** Agua útil disponible (%) de 0 a 100 cm de profundidad durante todo el ciclo del cultivo para las condiciones hídricas riego y secano del GM V.

### Consumo de agua

La figura 9 muestra la evapotranspiración acumulada para los diferentes grupos de madurez bajo riego y en seco. Se puede observar que la misma fue mucho mayor bajo condiciones hídricas no limitantes, con valores de 810, 813 y 829 mm acumulados de evapotranspiración comparado con los 515, 585 y 546 mm evapotranspirados en condiciones de secano para los grupos III, IV y V, respectivamente.

Se puede ver también, que entre los diferentes grupos de madurez en las mismas condiciones hídricas la evolución y los valores obtenidos fueron similares.



**Figura 9.** Dinámica de la evapotranspiración (mm) acumulada durante el ciclo del cultivo para los grupos de madurez III, IV y V bajo condiciones de riego (izquierda) y en secano (derecha).

### Eficiencia de uso del agua

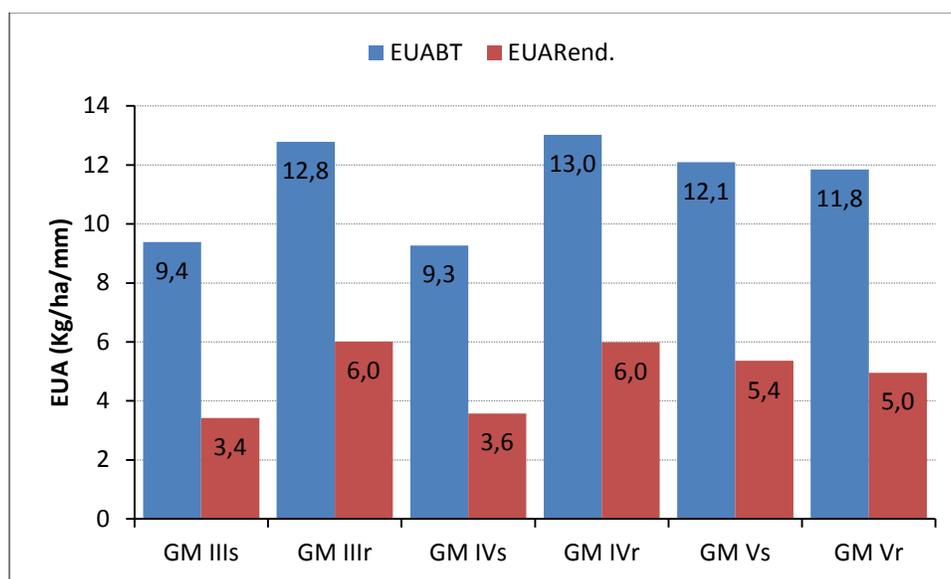
La biomasa producida por unidad de agua consumida expresa la eficiencia con la cual un órgano o un cultivo fija carbono en relación con el agua que transpira, y se define como eficiencia en el uso del agua (EUA) (Dardanelli *et al*, 2003).

En la figura 10 se presentan los valores de EUA para la biomasa total ( $EUA_{BT}$ ) y el rendimiento en granos ( $EUA_{RG}$ ) de todos los tratamientos realizados.

En condiciones de secano, el GM III tuvo una  $EUA_{BT}$  de  $9,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  y de  $3,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  para  $EUA_{RG}$ . Para este mismo GM pero bajo riego, dichos valores fueron de  $12,8$  y  $6,0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ , respectivamente.

Para el caso del GM IV en condiciones de secano, se obtuvieron valores de  $9,3$  y  $3,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  de biomasa total y rendimiento en grano respectivamente y bajo riego  $13,0$  (biomasa total) y  $6,0$  (rendimiento en grano).

Por último, el GM V, presentó a diferencia de los otros dos grupos de madurez un mayor valor tanto en biomasa total como rendimiento en grano bajo condiciones de secano. Llegando a  $12,1$  y  $5,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  en condiciones de secano para la biomasa total y el rendimiento en grano respectivamente y en el caso del GM V bajo riego  $11,8$  y  $5,0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  de agua consumida.



**Figura 10.** Eficiencia en el uso del agua de la biomasa total ( $EUA_{BT}$ ) y del rendimiento en grano ( $EUA_{RG}$ ) para los grupos de madurez III, IV y V bajo riego y en secano.

En la tabla 3 se puede observar que tanto la EUA de la biomasa total como la del rendimiento en granos no varían para los diferentes grupos de madurez (III, IV y V) y si lo hacen para la condición hídrica, presentando en ambos casos mayor EUA el tratamiento bajo riego.

**Tabla 3.** Promedio de la EUA para Biomasa y rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ ) en los GM y condición hídrica

GM Condición hídrica	EUA	
	Biomasa total	Rendimiento en granos
III	11,1	4,7
IV	11,0	4,8
V	11,1	4,8
Secano	10,2	4,1
Riego	12,5	5,7

Se han hallado EUA para soja entre  $5\text{-}6 \text{ kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$  y  $11 \text{ kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ , mientras que para maíz se citan valores desde  $10\text{-}12 \text{ kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$  hasta los  $24 \text{ kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$  con valores intermedios de  $17\text{-}20 \text{ kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$  (Della Maggiora *et al.*, 2009).

Salado Navarro (2008), encontró en lotes de distintas localidades de la Región Pampeana húmeda, durante tres años, valores promedio de EUA transpirada (estimada como los kilogramos de soja producida por mm de agua transpirados por el cultivo) de  $9,50$ ;  $8,31$  y  $8,26 \text{ kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$  para soja/trigo, soja/soja y soja/maíz, respectivamente. La EUA evapotranspirada fue algo menor,  $7,06$ ,  $6,40$  y  $7,04 \text{ kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ , respectivamente. Los menores valores de EUA evapotranspiradas de soja sembrada sobre rastrojo de soja, se debieron a las mayores tasas de evaporación que se registraron en el monocultivo con respecto a las rotaciones con maíz. Estos resultados señalan la baja eficiencia del monocultivo soja en la economía del agua útil.

## COMPONENTES DEL RENDIMIENTO Y PRODUCCIÓN DE GRANOS

Como en todos los cultivos de grano, el rendimiento del cultivo de soja, resulta de dos componentes numéricos principales que no son plenamente independientes entre sí: el número de granos que se establecen por unidad de área y el peso unitario que los mismos alcanzan.

En la tabla 4 se muestran los datos estadísticos del rendimiento y sus componentes (N° semillas  $m^{-2}$  y peso de 100 semillas) para los dos factores en estudio (GM y condición hídrica y sus interacciones).

Evaluando N° de semillas  $m^{-2}$ , se puede observar que hay diferencias estadísticamente significativas entre los tres grupos de madurez (III, IV y V), presentando el valor más alto el GM V, seguido por el IV y por último el valor más bajo para el GM III. El N° de semillas  $m^{-2}$ , presentó diferencias estadísticamente significativas para la condición hídrica riego respecto de la condición seco.

En la interacción de factores GM x CON los GM III, IV y V bajo la condición hídrica riego no presentaron diferencias, al igual que los GM III y IV en seco, pero ambos si se diferenciaron con el grupo V seco que presentó un valor superior.

Para el segundo componente del rendimiento (peso de 100 granos), en lo que respecta a la VAR, los grupos III y IV se diferenciaron estadísticamente del V, siendo este último inferior.

Por otra parte para el peso de 100 granos, se presentan diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos seco y riego.

En la interacción GM x CON el peso de 100 semillas se dio con el mismo valor estadístico para el grupo III y IV bajo riego y el GM V bajo riego y seco también presentó estadísticamente el mismo valor. En cambio, el GM III en seco se diferenció de todos los demás al igual que el GM IV seco.

Por último, si se evalúan los resultados del rendimiento en kilogramos por hectárea, no hubo diferencias estadísticamente significativas entre los GM III, IV y V. En cambio para la condición seco y riego si hubo grandes diferencias, presentando el tratamiento bajo riego un valor superior al doble que el de seco.

En el caso de la interacción GM x CON, el rendimiento fue el mismo estadísticamente para III y IV seco y III y IV riego, mientras que el GM V bajo el tratamiento de riego se diferenció estadísticamente de todos los demás, al igual que el V de condición hídrica seco.

**Tabla 4.** Número de semillas por superficie, peso de 100 semillas y rendimiento en granos para los grupos de madurez (GM), la condición hídrica (CON) y la interacción GM x CON

Fuente de Variación	Factores	N° semillas m <sup>-2</sup>	Peso 100 semillas (g)	Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )
GM	III	1680,6 b	19,26 a	3321,1
	IV	1772,4 ab	19,53 a	3481,0
	V	1925,2 a	18,25 b	3516,1
CON	Secano	1227,6 b	18,42 b	2259,1 b
	Riego	2357,8 a	19,61 a	4619,7 a
GM x CON	III <sub>s</sub>	978,3 c	17,99 c	1762,7 d
	III <sub>r</sub>	2382,8 a	20,53 a	4879,4 a
	IV <sub>s</sub>	1090,6 c	19,15 b	2089,5 d
	IV <sub>r</sub>	2454,2 a	19,92 a	4872,6 a
	V <sub>s</sub>	1614,1 b	18,13 c	2925,1 c
	V <sub>r</sub>	2236,3 a	18,38 c	4107,1 b
Valor de p	GM	0,0468	<0,0001	0,5400
	CON	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	GM x CON	0,0001	0,0001	<0,0001

P= probabilidad, para cada variable, factor y su interacción, letras distintas indican diferencias estadísticas (5% test de Duncan)

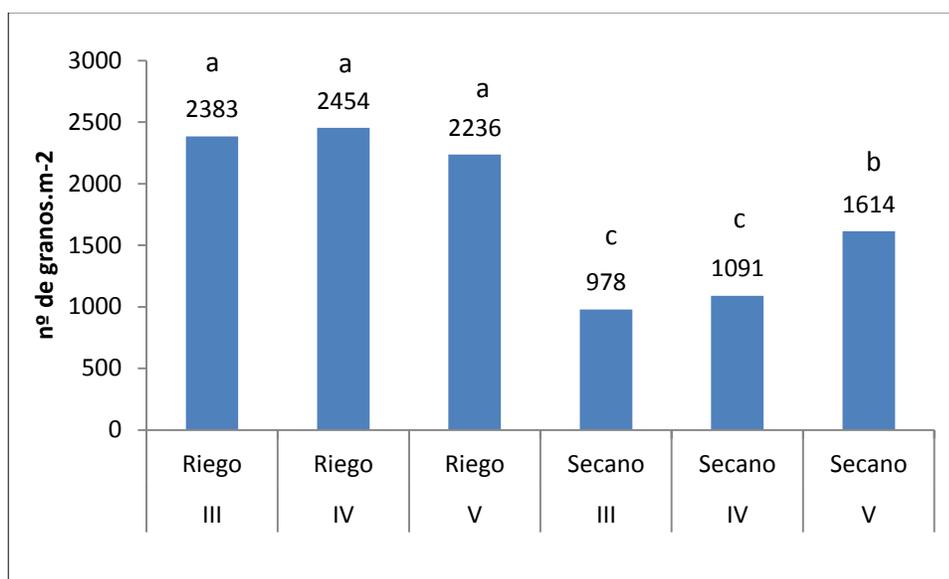
El peso de los granos de soja puede variar en un rango amplio, entre 80 y más de 400 mg 100<sup>-1</sup>. Dentro de las variedades de soja que se cultivan tradicionalmente y para la mayor parte de las condiciones ambientales, el peso individual de los granos suele variar entre 140 y 220 mg 100<sup>-1</sup>. Las principales diferencias entre genotipos en el peso de los granos son atribuibles a diferencias en la tasa de crecimiento de los mismos (Kantolic *et al.*, 2003). Esto se puede observar en tabla 3 en los resultados del peso de 100 granos.

En un estudio realizado en Balcarce, se estudió la respuesta de los componentes del rendimiento a deficiencias hídricas durante diferentes periodos en dos años de cultivo de un GM III (indeterminado). El tratamiento con riego produjo un rendimiento de 5030 kg ha<sup>-1</sup>, el tratamiento con sequía entre R1-R4 4660 kg ha<sup>-1</sup>, 4100 kg ha<sup>-1</sup> para sequía entre R4-R6 y 4000 kg ha<sup>-1</sup> para el tratamiento con condiciones hídricas deficitarias entre R1-R6. Siendo estadísticamente iguales los primeros dos tratamientos y los últimos dos respectivamente (Kantolic *et al.*, 2003). Esto muestra cómo afecta en mayor medida un déficit hídrico a partir de R4, precisamente la etapa donde los tratamientos en seco de los tres GM tuvieron falta de agua.

En la siguientes figuras se presentan los componentes directos del rendimiento del cultivo de soja, número de granos por m<sup>2</sup> y peso de 100 granos, y sus respuestas a los factores en estudio (GM y condición hídrica), medidas en la etapa fenológica R8.

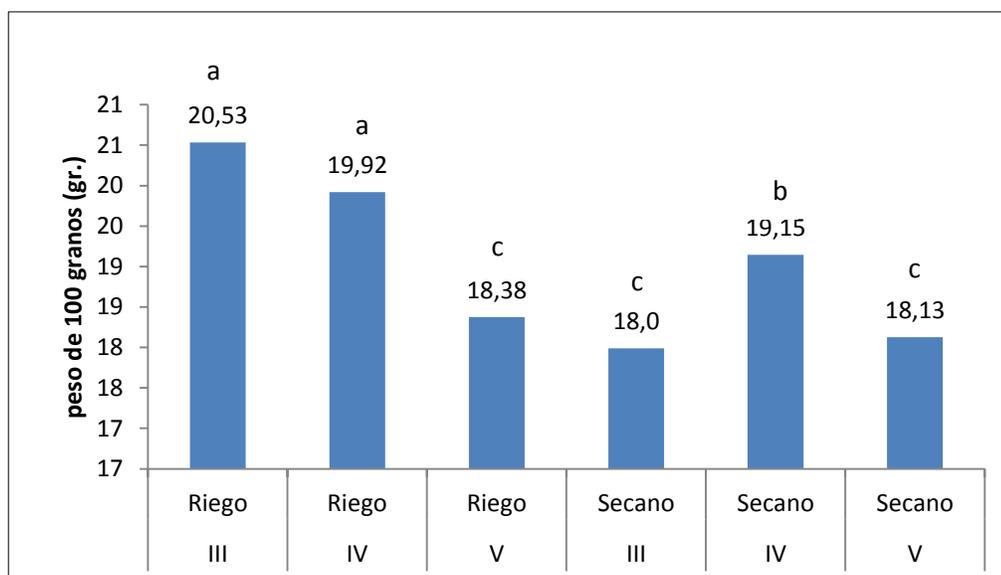
El número de granos por metro cuadrado varió estadísticamente ( $p < 0,0001$ ) en respuesta a la interacción grupo de madurez\*condición hídrica. Las semillas por metro cuadrado bajo riego fueron superiores, en los tres grupos de madurez, sin diferencias entre ellos, pero sí con respecto a la condición de secano. En ésta última cabe señalar la diferencia entre genotipos, donde el GM V superó a los otros dos con un N° de semillas m<sup>2</sup> significativamente mayor.

También se puede ver el valor promedio de ambas condiciones hídricas, siendo en riego de 2358 y en secano 1228 granos m<sup>-2</sup>.



**Figura 11.** Número de granos por metro cuadrado en R8 para la interacción grupo de madurez\*condición hídrica.

El peso de 100 granos (Figura 12) también respondió significativamente ( $p = 0,0001$ ) al efecto de la interacción grupo de madurez\*condición hídrica.



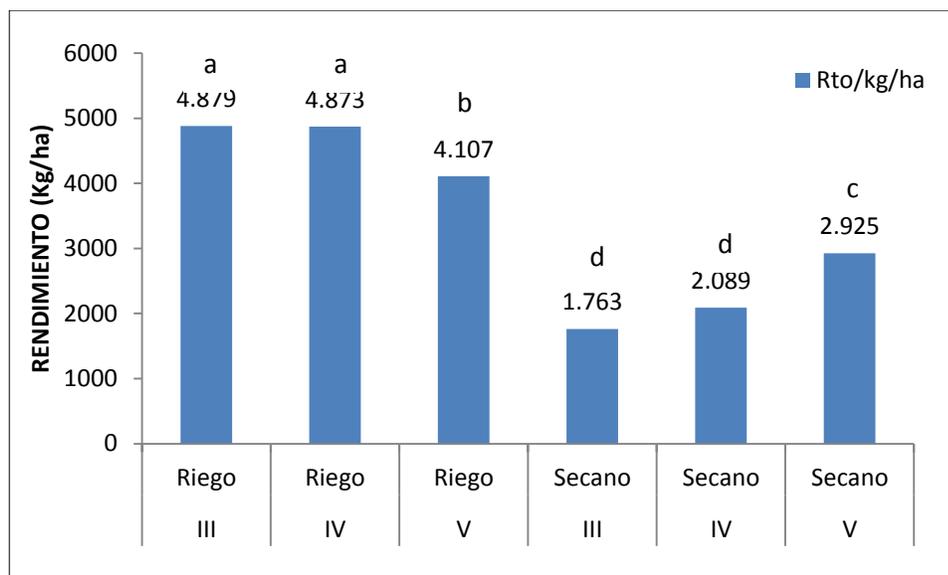
**Figura 12.** Peso de 100 granos (g) en R8 para la interacción grupo de madurez\*condición hídrica.

Los GM III y IV bajo riego alcanzaron el mayor peso individual de granos, seguidos del GM IV y III en secano. Nuevamente el GM V mostró un patrón de respuesta diferente con valores de peso de 100 granos similares entre ambas condiciones hídricas.

El peso final del grano de soja está limitado por fuente. Cuando se producen restricciones durante la floración y a comienzos de la fructificación, aumentan el aborto de vainas y granos, por esto la disponibilidad de asimilados por unidad de granos puede aumentar si las condiciones son buenas durante el llenado, consecuentemente se puede llegar a compensar parcialmente la disminución en el número de granos. Pero a medida que el ciclo progresa, esta posibilidad de compensación disminuye. El mayor déficit hídrico en el ciclo del cultivo de soja ocurrió en enero, esto explicaría la diferencia entre riego y secano para los distintos grupos de madurez. (D'Adan, 2014)

Hubo diferencias estadísticamente significativa ( $p < 0,0001$ ) en el rendimiento de granos para la interacción grupo de madurez\*condición hídrica (figura 17). El patrón de respuesta observado fue similar al descrito para el número de semillas  $m^2$ , componente de mayor influencia en la determinación del rendimiento del cultivo. Es así que bajo riego los tres GM produjeron los rendimientos más altos, destacándose los GM III y IV. En secano, ocurrió lo contrario ya que el GM V superó a los otros dos GM, mostrando una mayor plasticidad expresada en una diferencia menor entre las dos condiciones hídricas. Los diferentes grupos de madurez fueron inferiores para la

condición hídrica secano. La mayor diferencia se vio en el GM III ya que en secano el rendimiento fue de 1763 kg ha<sup>1</sup> y con riego de 4879 kg ha<sup>1</sup>.



**Figura 13.** Rendimiento de granos (kg.ha<sup>1</sup>) en R8 para la interacción grupo de madurez\*condición hídrica.

En el gráfico 13 se observa que en el tratamiento riego el rendimiento fue mayor para el GM III y IV (4.879 y 4.873 kg ha<sup>1</sup> respectivamente) respecto del GM V (4.107 kg ha<sup>1</sup>).

En cambio, para el tratamiento secano, los resultados fueron diferentes, el GM V tuvo el mayor rendimiento (2.925 kg ha<sup>1</sup>), seguido por el GM IV (2.089 kg ha<sup>1</sup>) y por último el GM III (1.763 kg ha<sup>1</sup>).

Estos resultados muestran que el GM V es el que mayor estabilidad presentó frente a las diferentes condiciones hídricas, ya que la diferencia de rendimiento entre una y otra es mucho menor que en los GM III y IV. Esto se debió a los diferentes escenarios ambientales que hubo en el periodo crítico de cada GM, tal como se mencionó al comienzo, existen en el ciclo momentos de alta sensibilidad llamados períodos críticos, donde un estrés puede afectar el rendimiento, limitando la capacidad compensadora (Salinas y Martellotto, 2012). En el caso del tratamiento bajo riego suplementario, el GM V, al presentar su periodo crítico en febrero, tuvo una menor cantidad de radiación y temperatura que los otros dos GM que tuvieron dicho periodo en enero. Para el tratamiento en condiciones de secano, la disponibilidad hídrica fue la causa del mayor rendimiento del GM V, ya que en el año que se realizó el ensayo las lluvias comenzaron a principios de febrero, coincidiendo con el periodo crítico de este cultivar y por ende favoreciendo el rendimiento.

## CONCLUSIONES

Se acepta parcialmente la hipótesis planteada, la EUA (biomasa y rendimiento) no varió entre GM, independientemente de la condición hídrica de cada grupo. Esta variable se modificó con la condición hídrica, los tratamientos regados tuvieron mayor EUA respecto a los de secano.

La producción de biomasa total se duplicó en el tratamiento bajo regadío respecto del tratamiento secano. El GM mayor tuvo más biomasa, aunque las diferencias se diluyeron hacia el final del ciclo.

El rendimiento en grano fue mayor bajo riego respecto del tratamiento de secano. Los GM no presentaron diferencias en el rendimiento.

Para la interacción entre factores (GM x CON); bajo riego los GM menores (III y IV) lograron mayor rendimiento que el V; por su parte en la condición de secano esta relación fue inversa. Eso se debió a la oferta de condiciones durante el período crítico. La mayor radiación y temperatura la tuvieron los GM III y IV y lograron expresar su potencial sin limitaciones hídricas, cuando estos materiales fueron expuestos a esas condiciones sin el aporte de riego suplementario tuvieron una mayor caída en el rendimiento que el GM V. Este último fue más estable, pues tuvo menor impacto en el rendimiento bajo ambas condiciones hídricas, debido a que su etapa reproductiva (crítica) coincidió con una mejor oferta ambiental, y lograron eludir el gran déficit hídrico que se presentó.

Esta respuesta en el rendimiento tiene alta relación en sus componentes, y dentro de ellos el número de granos más que el peso individual.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D. y SMITH, M. (1998). *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome.
- ANDRADE F.H, AGUIRREZÁBAL L.A.N, RIZZALLI R.H. 2009. Crecimiento y rendimiento comparados. En Andrade, F. y Sadras, V. (Ed.). *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. 3° ed. Graficas El Vikingo. Argentina. Cap 3 pp. 41-67.
- ANDRIANI, J. M.; ANDRADE, F. H.; SUERO, E y DARDANELLI, J. 1991. Water deficit during reproductive growth of soybean. I. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and its components. *Agronomie* 11: 739-746.
- ANDRIANI. 1996. Soja: Uso del agua y riego. En: M. SC HECTOR EJ BAIGORRI; M SH PH D. LUIS R. SOLADO NAVARRO. *El cultivo de soja en Argentina*. ISBN: 978-987-27584-1-7. Pp 163-174
- BODRERO, M; ANDRIANI, J.; BACIGALUPO, S.; GERSTER, G.; QUIJANO, A.; MARTIGNONE, R. y A. VAN LACKE. 2002. Factores limitantes del rendimiento y determinantes de su variabilidad en el cultivo de soja, campaña 2001-02. *Para mejorar la producción de Soja*. E.E.A. Oliveros. 45 p.
- CÁRCOVA J; ABELEDO L. G; y PEREIRA M. L. 2003. Analisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes. *Producción de granos, bases funcionales para su manejo*. Editorial facultad de agronomía, Universidad de Buenos Aires. Cap 6. Pp. 75-98.
- D´ADAN Y. 2014. Nodulación y balance relativo de nitrógeno de diferentes cultivares de soja en secano y bajo riego. TFG FAV-UNRC
- DARDANELLI J.; D. COLLINO; M. E. OTEGUI y V. O. SADRAS. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. En: SATORRE E.; R. BENECH ARNOLD; G. SLAFER; E. DE LA FUENTE; D. MIRALLES; M. OTEGUI y R. SAVIN. *Producción de granos*. Editorial facultad de agronomía. UBA. Cap. 16. pp 377 - 406.
- DELLA MAGIORA A.I.; J.M. GARDIOL y A.I. IRIGOYEN. 2002. Requerimientos Hídricos. En Andrade, F. y Sadras, V. (Ed.). *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. 2° ed. Graficas Sirio. Argentina. Cap 6 pp. 155-171.
- DELLA MAGIORA A.I.; J.M. GARDIOL y A.I. IRIGOYEN. 2009. Requerimientos Hídricos. En Andrade, F. y Sadras, V. (Ed.). *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. 3° ed. Graficas El Vikingo. Argentina. Cap 6 pp. 115-126.

- DI RIENZO J.A., CASANOVES F., BALZARINI M.G., GONZALEZ L., TABLADA M., ROBLEDO C.W. InfoStat versión 2014. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- EGLI, D. B. 1998. Variation in leaf starch and sink limitations during seed filling in soybean. *CropSci.*, 39: 1361-1368.
- FEHR, W.R. y C. E. CAVINESS. 1977. Stages of soybean development. *Iowa St.Univ. SpecialReport* 80. 11p.
- INFOSTAT, 2011. InfoStat, versión 2011. Grupo InfoStat, F.C.A. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.
- KANTOLIC A.G.; GIMENEZ P.I. y FUENTE E.B. 2003.Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja. *Producción de granos, bases funcionales para su manejo*. UBA. Cap 9 pp 167-201.
- LEOPOLD, A. C. 1983. Volumetric components of seed imbibition. *PlantPhysiol.* 73:677-680.
- MOCATELLI. 2008. Soja: Uso del agua y riego. En: M. SC HECTOR EJ BAIGORRI; M SH PH D. LUIS R. SOLADO NAVARRO. *El cultivo de soja en Argentina*. ISBN: 978-987-27584-1-7. Pp 163-174
- NAVARRO SALADO L. R. 2012. Ecofisiología de la soja. *El cultivo de soja en Argentina*. INTA. ISBN: 978-987-27584-1-7. Pp. 83-102
- NORMAN A. 1983. *Fisiología, mejoramiento, cultivo y utilización de la soja*. Editorial hemisferio sur. 247p.
- PERTICARI, A.; ARIAS, N.; BAIGORRI, H; DE BATTISTA, J.J.; LETT, L.; MONTECCHIA, M.; PACHECO BASURCO, J.C.; SIMONELLA, A.; TORESANI, S.; VENTIMIGLIA, L. y R. VICENTI. 2003. Inoculación y fijación biológica de nitrógeno en el cultivo de soja. En: Satorre, E. *El libro de la soja*. Buenos Aires: Servicios y Marketing Agropecuario, pp 69 - 76.
- SADRAS, V. O., FERREIRO, M., GUTHEIM, F. Y KANTOLIC, R. H. 2002. Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperíodo. En Andrade, F. y Sadras, V. (Ed.). *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. 2º ed. Graficas Sirio. Argentina. Cap 2 pp. 25-56.
- SAGPyA. 2005. Estadísticas de cereales y oleaginosas. En: [www.sagpya.mecom.gov.ar](http://www.sagpya.mecom.gov.ar). Consultado: 05/08/2011.
- SALADO NAVARRO L. R. 2012. Ecofisiología de Soja. En: M. SC HECTOR EJ BAIGORRI; M SH PH D. LUIS R. SOLADO NAVARRO. *El cultivo de soja en Argentina*. ISBN: 978-987-27584-1-7. Pp 83-102

- SALINAS A., ZELENER N., CRAVIOTO R. M. y V. BISARO. 1996. Respuestas fisiológicas que caracterizan el comportamiento de diferentes cultivares de soja a la deficiencia hídrica en el suelo. *pesq. agprop. bras.* V 31. N 5 pp 331-338.
- SALINAS A. I; MARTELLOTTA E. 2012. Soja: Uso del agua y riego. En: M. SCHECTER EJ BAIGORRI; M SH PH D. LUIS R. SALADO NAVARRO. *El cultivo de soja en Argentina*. ISBN: 978-987-27584-1-7. Pp 163-174
- SCOTT, W. y S. ALDRICH. 1975. *Producción moderna de la soja*. Editorial Hemisferio Sur.192p.
- SIIA, 2011. Sistema integrado de información agropecuaria. Estadísticas. En: [www.sia.gov.ar](http://www.sia.gov.ar). Consultado: 07/08/2011.
- SEILER, R.A., FABRICIUS, R., ROTONDO, V. y VINOCUR, M. 1995. Agroclimatología de Río Cuarto – 1974/93, vol. I. UNRC. 68 p.