

# Brecha de rendimiento del cultivo de soja estimada con el modelo AquaCrop en la región central de Córdoba, Argentina

de la Casa, A.; Ovando, G.; Díaz, G.; Bressanini, L. y Miranda, C.

## RESUMEN

La diferencia del rendimiento potencial con respecto al efectivo establece la brecha de rendimiento (Br) de un cultivo, indicador utilizado para evaluar las restricciones que el ambiente impone sobre su productividad. Bajo condiciones genéticas, edáficas y de manejo constantes a lo largo del tiempo, el principal responsable de Br es la acción climática que, en un dominio subhúmedo, se vincula principalmente con la variación de la oferta y demanda de agua. A partir de la información monitoreada en 2014-2015 en un lote de soja ubicado al sur de la localidad de Córdoba, Argentina, el modelo AquaCrop se calibró para estimar Br y evaluar el riesgo climático en esta región. A fin de ponderar la influencia climática de manera retrospectiva, se desarrolló y verificó un procedimiento que estima la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) a partir de los valores diarios de temperatura máxima y mínima. Estos valores de  $ET_0$ , junto a los registros de lluvia, permitieron extender la evaluación entre 1960 y 2012. De acuerdo a los resultados experimentales el valor de productividad del agua utilizado para estimar la producción de biomasa de soja a tasa potencial fue  $13,1 \text{ g m}^{-2}$ . Los valores observados de cobertura, biomasa aérea y agua del suelo en distintos sectores del lote resultaron similares a los estimados por AquaCrop, en especial cuando se consideran condiciones de escurrimiento superficial de agua particulares para cada sitio. Haciendo corridas sucesivas con AquaCrop para la fecha de siembra de la calibración (22 de noviembre), alrededor de 42% de los ciclos presentan Br menores a  $750 \text{ kg ha}^{-1}$ , las que se incrementan a medida que desmejora la relación entre oferta y demanda de agua. Al analizar el efecto de distintas oportunidades de siembra, los resultados muestran que en 51% (27/53) de los años la decisión influye relativamente poco sobre el resultado productivo. El cambio de la oportunidad de siembra en el 49% restante incrementa la dispersión de Br, lo que permite descartar las decisiones más tempranas (15 de octubre y esperando una acumulación de 50 mm de lluvia desde el 20 de setiembre) por presentar valores significativamente ( $P < 0,10$ ) más elevados.

**Palabras clave:** evapotranspiración; cobertura del cultivo; biomasa; agua del suelo; riesgo climático

de la Casa, A.; Ovando, G.; Díaz, G.; Bressanini, L. and Miranda, C., 2018. Yield gap of soybean crop estimated with AquaCrop model in central region of Córdoba, Argentina. RADA IX: 1-19

## SUMMARY

The difference between potential and actual yield establishes the yield gap (Br) of a crop, an indicator used to evaluate the constraints that the environment imposes on its productivity. Under genetic, edaphical and management conditions constant over time, the main responsible for Br results from the climatic action that, in a sub-humid domain, is mainly linked to the variation of water supply and demand. From the information monitored in 2014-2015 in a soybean plot located south of Córdoba city, Argentina, AquaCrop model was calibrated to estimate Br and assess the climatic risk in this region. To assess the climatic influence retrospectively, a procedure was developed and verified that estimates the reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) from the daily values of maximum and minimum temperature. These  $ET_0$  values together with the rainfall records, allowed to extend the evaluation between 1960 and 2012. According to the experimental results, the water productivity used to estimate the production of soybean biomass at a potential rate was  $13.1 \text{ g m}^{-2}$ . The observed values of crop coverage, aerial biomass and soil water in different sectors of the plot were similar to those estimated by AquaCrop, especially when considering particular surface water runoff conditions for each site. Making successive runs with AquaCrop for the sowing date of the calibration on November 22, around 42% of the crop seasons have Br less than  $750 \text{ kg ha}^{-1}$ , which increases as the relationship between supply and demand of water deteriorates. When analyzing the effect of different sowing opportunities, the results show that in 51% (27/53) of the years, the decision has relatively little influence on the productive outcome. The change of the planting opportunity in the remaining 49% increases the dispersion of Br, which allows discarding the earliest decisions (October 15 and expecting a 50 mm rainfall accumulation from September 20) because they present significantly ( $P < 0.10$ ) higher values.

**Keywords:** evapotranspiration; crop coverage; biomass; soil water; climate risk

*de la Casa, A.; Ovando, G. y Díaz, G.: Agrometeorología. Bressanini, L.: Agrotecnia. Facultad de Ciencias Agropecuarias (UNC), Córdoba CP: 5000, Argentina. Miranda, C.: Establecimiento Las Delicias. Contacto: delacasa@agro.unc.edu.ar*

## INTRODUCCIÓN

El rendimiento potencial ( $R_p$ ) de un cultivo expresa la máxima productividad de un genotipo que crece y se desarrolla bajo la ausencia de limitaciones de agua, luz y nutrientes en una región (Loomis and Connor, 1992; Evans, 1993). Por su parte, la diferencia que se suscita entre  $R_p$  y la productividad que efectivamente alcanza el cultivo ( $R$ ) representa la brecha de rendimiento (Br) (Cassman et al., 2003; Lobell et al., 2009). La evaluación de este indicador en una región es relevante tanto a los efectos de realizar un manejo agronómico y financiero eficiente del cultivo, como para establecer pautas que orienten a su mejoramiento genético. Reducir la brecha de rendimiento de un cultivo de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) en secano es una meta difícil de alcanzar en el centro de la provincia de Córdoba, Argentina, donde la importante variabilidad interanual de la lluvia en un dominio climático sub-húmedo determina que la falta de agua sea una contingencia presente

todos los años con mayor o menor intensidad. En esta región agrícola de relativa vulnerabilidad principalmente por la falta de agua, conocer la fluctuación y frecuencia de Br resulta necesario para diseñar las estrategias de manejo más apropiadas tendientes a reducir el riesgo climático.

En secano es frecuente que los cultivos de soja experimenten limitaciones productivas ocasionadas por la disponibilidad de agua, tanto por la insuficiencia y retraso de la oferta como por tasas de evapotranspiración muy elevadas durante el verano. Por otra parte, tampoco se puede descartar por completo algunos años en que el aporte de lluvia resulta excesivo, particularmente en las zonas bajas de los predios (van Ittersum et al., 2013). Entre ambos extremos, las condiciones atmosféricas de oferta y demanda de agua durante algunos ciclos de producción se equilibran de modo que es posible reducir Br hasta alcanzar su expresión mínima. Para un cultivo de secano bien manejado, tales circunstancias se pueden aprovechar a fin

de evaluar  $R_p$  o, al menos, determinar un valor de productividad que se considera no limitado por la disponibilidad de agua ( $R_{pw}$ ) (Passioura and Angus, 2010; van Ittersum et al., 2013).

La determinación de  $R_p$  para un cultivo o variedad es difícil de implementar de manera experimental debido a la necesidad de controlar los múltiples factores que lo determinan en forma integrada y efectiva, lo que en parte explica la relativa escasez de esta información (Duvick and Cassman, 1999; Grassini et al., 2011). La falta de datos de productividad potencial medidos a campo para distintas regiones y épocas de cultivo es bastante extendida en la Argentina en general y la provincia de Córdoba en particular. Una forma alternativa para evaluar  $R_p$  es utilizando modelos de simulación de cultivos, que constituyen herramientas informáticas relativamente confiables, en particular cuando se dispone de información meteorológica y edáfica apropiada en extensión y detalle (Abeledo et al., 2008; Lobell et al., 2009). En este sentido, la información meteorológica no siempre resulta disponible, en particular cuando se requiere procesar el valor de la evapotranspiración de referencia ( $ET_c$ ) a partir de la metodología de Penman-Monteith (Allen et al., 1998). En primer término, como el procedimiento utiliza un conjunto de cuatro variables atmosféricas (radiación solar (o heliofanía), temperatura y humedad del aire y velocidad del viento), su uso queda restringido a lugares que por lo general disponen de una estación meteorológica con dotación instrumental completa. Además, esta restricción se acentúa en la medida que la evaluación debe prolongarse a lo largo del tiempo. Para salvar estos inconvenientes generalizados, se han desarrollado procedimientos que permiten estimar  $ET_c$  haciendo uso de la información meteorológica disponible, como el programa ET0Calc (FAO, 2012).

Con respecto al uso de modelos de cultivo para estimar  $R_p$ , Grassini et al. (2009) presentaron una evaluación en maíz (*Zea mays*) a los efectos de evaluar los límites productivos de la región oeste del cinturón de maíz en USA a partir del modelo Hybrid-Maize (Yang et al., 2004). Por su parte, Caldiz et al. (2001) elaboraron una zonificación agroecológica del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) para la Argentina en base a valores de  $R_p$  estimados con el modelo LINTUL-POTATO (Kooman, 1995). En trigo (*Triticum aestivum*), Andarzian et al. (2011) desarrollaron un modelo simple para estimar el potencial de rendimiento basado en datos meteorológicos mensuales que utilizan para hacer recomendaciones en sistemas de agricultura sitio-específica. Karimaya (2014) empleó el modelo AquaCrop para estimar el rendimiento potencial de

la variedad de soja Jenguma en Ghana, teniendo en cuenta sólo limitaciones climáticas. En Argentina, Aramburu Merlos et al. (2015) emplearon el modelo de cultivo DSSAT junto con información meteorológica, edáfica y de manejo para simular  $R_p$ ,  $R$  y  $Br$  de soja, maíz y trigo para cuantificar el potencial de estos cultivos de incrementar la producción, a través de la disminución de la  $Br$ , en lugar de expandir el área sembrada.

La información que se obtiene del relevamiento de un cultivo en un lote de producción ha sido útil para evaluar la productividad real e identificar los principales factores que restringen la producción en los distintos sectores (Mercau et al., 2001; Sadras et al., 2002; Lobell et al., 2005). La falta de diseño experimental y de hipótesis específicas, si bien dificulta establecer relaciones causales de una manera estricta, puede ser apropiada a los efectos de determinar los principales factores responsables de la brecha de rendimiento (Wiese, 1982; Sadras et al., 2002).

Los modelos de cultivo han evolucionado de manera notable en los últimos años, existiendo distintos procedimientos disponibles a fin de hacer proyecciones del rendimiento de los cultivos a distintas escalas, desde local hasta regional y mundial (van Wart et al., 2013). En general, a partir de un valor de  $R_p$  determinado por el genotipo, la densidad de siembra y las condiciones particulares de radiación y régimen térmico de una región, la productividad real se calcula de acuerdo al nivel tecnológico aplicado, teniendo en cuenta la cantidad y oportunidad de agua utilizada, la fertilidad del lote, las prácticas de manejo, etc. Esta diversidad de modelos de cultivo permite clasificar los procedimientos siguiendo diferentes criterios. Los modelos pueden ser genéricos, cuando la estructura de cálculo es común para distintos cultivos, o específicos, desarrollados para simular el crecimiento y desarrollo de cada especie en particular. Así, mientras los modelos CERES-Wheat (Singh et al., 2008) y CERES-Maize (Jones et al., 2003) aplican de manera específica para trigo y maíz, respectivamente, el modelo SOYGROW, si bien responde a una concepción similar a los anteriores, está diseñado para simular el comportamiento productivo de la soja, o el modelo SUBSTOR-Potato destinado para el cultivo de papa (Griffinet et al., 1995), etc. Por su parte, el modelo CROPSYST (Stockle et al., 2003) a partir de algunas simplificaciones, utiliza el mismo procedimiento para el crecimiento y desarrollo de todos los cultivos herbáceos.

Los modelos también se tipifican como simples o complejos, de acuerdo a la cantidad y detalle de los procesos ecofisiológicos e interacciones genotipo-ambiente que representan. El requeri-

miento de datos, que se incrementa a medida que aumenta la complejidad del modelo, constituye un aspecto que limita su implementación, en tanto los resultados obtenidos no son necesariamente más precisos que los producidos por modelos más simples (Constantin et al., 2015).

El procedimiento que sustenta el cálculo de la biomasa potencial ( $B_p$ ) también se puede utilizar para caracterizar el tipo de modelo de cultivo. En su gran mayoría, los modelos de cultivo más difundidos estiman  $B_p$  empleando el concepto de eficiencia en el uso de la radiación ( $EUR$ ) (Monteith 1977), a partir de la siguiente ecuación (Sinclair and Muchow, 1999):

$$B_p = EUR \times \sum_s^c RSFAI \quad (1)$$

Donde  $\sum_s^c$  representa un valor acumulado entre siembra ( $s$ ) y cosecha ( $c$ ), y  $RSFAI$  es la radiación solar fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo diariamente.

Otros modelos, en cambio, utilizan el concepto de eficiencia en el uso del agua ( $EfT$  o  $WUE$ ) (Stanhill, 1986) a fin de obtener la productividad potencial, de acuerdo a la siguiente expresión análoga a (1) (Passioura and Angus, 2010):

$$B_p = EfT \times \sum_s^c T \quad (2)$$

Donde  $T$  es la cantidad de agua transpirada y  $EfT$  es la eficiencia de la transpiración o productividad del agua.

Luego, la determinación de  $R_p$  se resuelve adjudicando una fracción de  $B_p$  que se asimila en los órganos de cosecha. En general, esta tasa se define como el índice de cosecha ( $IC$ ) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$R_p = B_p \times IC \quad (3)$$

El modelo AquaCrop (Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009) fue diseñado para simular el crecimiento, desarrollo y rendimiento de un cultivo que, de acuerdo a los criterios expuestos, corresponde a un procedimiento de tipo genérico, simple y aplica el concepto de eficiencia o productividad del agua ( $WP$ ) para obtener  $R_p$ . Un aspecto distintivo de AquaCrop es la utilización de la cobertura del cultivo ( $CC$ ), no sólo para caracterizar su crecimiento y desarrollo durante el ciclo, sino también para separar el valor improductivo del agua evaporada ( $E$ ) respecto a la que el cultivo transpira ( $T$ ) en el proceso de evapotranspiración ( $ET$ ) y que, en consecuencia, promueve una acción fisiológica efectiva. A partir de (2), AquaCrop representa la producción de  $B_p$  de un cultivo utilizando la siguiente ecuación (Steduto et al., 2009):

$$B_p = WP^* \sum \left( \frac{T}{ET_0} \right)_{(CO_2)} \quad (4)$$

Donde  $WP^*$  corresponde a la productividad del agua ( $EfT$  en (2)) que, normalizada de acuerdo a la demanda evaporativa de la atmósfera ( $ET_0$ , evapotranspiración de referencia calculada de acuerdo el método FAO de Penman-Monteith (Allen et al., 1998)), propia de cada condición climática y estación del año, y al incremento temporal de la concentración del dióxido de carbono ( $CO_2$ ), se presenta como un atributo ecofisiológico de carácter conservativo (Steduto et al., 2007). De esta forma, el modelo adquiere la versatilidad necesaria para representar la productividad de distintos ambientes y épocas de cultivo a lo largo del tiempo. Sin embargo, los valores de  $WP^*$  deben ser conocidos para aplicar el modelo de manera confiable y no existe aun mucha información al respecto, en particular para el cultivo de soja.

El cómputo de la productividad a partir de (1) ha sido explorado más intensamente y los valores de  $EUR$  son relativamente más difundidos (Steduto and Albrizio, 2005). Valores de  $EUR$  obtenidos de manera experimental para la soja y otros cultivos son presentados por Sinclair and Muchow (1999). Purcell et al. (2002) analizan la influencia de la densidad de plantación sobre la  $EUR$  y la producción de biomasa en soja, y Edwards y Purcell (2005) hacen lo propio considerando las diferencias entre los distintos grupos de maduración de la soja, evaluando tanto las características agronómicas como la capacidad de interceptación y uso de la radiación solar.

Los objetivos de este trabajo fueron: i) desarrollar un procedimiento destinado a obtener valores diarios de  $ET_0$  utilizando únicamente datos meteorológicos de temperatura máxima y temperatura mínima, con el propósito de elaborar una serie prolongada de  $ET_0$  que, junto a la información de lluvia, exprese la variación de las condiciones atmosféricas a través del tiempo en relación a la disponibilidad de agua; ii) ajustar el modelo AquaCrop para las condiciones de producción de soja en secano para la región central de Córdoba, Argentina, a partir de la información relevada en un lote de producción durante el ciclo 2014-2015; iii) evaluar el valor de productividad del agua ( $WP$ ) y corroborar su aptitud para estimar la producción de biomasa potencial ( $B_p$ ) haciendo uso del modelo de eficiencia en el uso de la radiación en términos comparativos; iv) estimar la variabilidad que ha experimentado en esta región la brecha de rendimiento de la soja a lo largo del tiempo para la producción de secano, a los efectos de establecer el nivel de riesgo de orden climático de este sistema de producción y evaluar distintas oportunidades de siembra que tiendan a reducirlo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### 1. Datos del cultivo de soja

El estudio se realizó a partir de los registros de crecimiento, desarrollo y productividad de un cultivo de soja en seco y sin fertilización de la variedad FERIA del Norte (GM 4,5), entre la siembra efectuada el 22/11/2014 y la cosecha el 11/04/2015. Los datos se relevaron en un lote de 45 ha, ubicado al sur de la ciudad de Córdoba (31°33' lat. Sur, 64°05' long. Oeste, 400 m s.n.m.). El suelo del predio corresponde a un Haplustol éntico, de la serie Manfredi, con un perfil de tres horizontes de textura franco-limosa. Las constantes hídricas empleadas para representar el balance de entradas y salidas de agua durante el ciclo

fueron establecidas de acuerdo a la descripción de un suelo ubicado próximo al lote por Dardanelli et al. (1997). La Tabla 1 presenta las principales características edáficas del lote que se integraron al archivo de suelo utilizado para ajustar AquaCrop a las condiciones locales.

Sobre el lote de forma rectangular se estableció una grilla de muestreo de 16 estaciones, 4 en sentido Norte-Sur y 4 en dirección Este-Oeste, en posiciones aproximadamente equidistantes. La Figura 1 presenta la ubicación de los sectores de muestreo en el lote con su identificación y las curvas de nivel sobrepuestas que indican la pendiente natural del terreno de Oeste a Este.

En cada fecha de muestreo se contó la cantidad de plantas en 5 metros lineales de dos filas

**Tabla 1.** Propiedades edáficas utilizadas para representar el suelo del lote al sur de la ciudad de Córdoba, Argentina (Dardanelli et al., 1997).

Horizonte	Textura	Profundidad (m)	Saturación	CC (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	PMP	ADT (mm m <sup>-1</sup> )	Ksat (mm día <sup>-1</sup> )	Tau
A	Franco	0-0,23	0,46	0,327	0,145	182	250	0,60
AC	Franco-limoso	0,24-0,46	0,46	0,290	0,117	173	225	0,58
C	Limoso	>0,47	0,44	0,270	0,115	155	200	0,554

Referencias: CC: Capacidad de campo; PMP: Punto de marchitez permanente; ADT: Agua disponible total; Ksat: Coeficiente de saturación; tau: Coeficiente de drenaje.



**Figura 1.** Imagen de Google Earth del 22/11/2015 correspondiente al lote de soja, con la ubicación de los 16 sectores de muestreo y las curvas de nivel sobrepuestas. Los cuadrados señalan los sectores de muestreo intensivo.

contiguas, separadas a 0,36 m, a fin de evaluar la población de plantas, y se efectuó el corte de la parte aérea de 3 de ellas para determinar la materia seca total de acuerdo a la población de cada sector. La valoración de la densidad de siembra en las primeras 4 fechas de muestreo arrojó un promedio general de 30 pl m<sup>-2</sup> para todos los sectores, de modo tal que esta población fue utilizada para ajustar AquaCrop a los efectos de estimar la evolución de la cobertura. Por su parte, el contenido de agua del suelo se determinó utilizando el método gravimétrico, a partir de un muestreo del perfil a 5 profundidades, con barrenadas cada 0,20 m. Estas mediciones se integraron a los efectos de obtener el contenido de agua del perfil hasta 1 m, considerando un valor uniforme de densidad aparente de 1,25 Mg m<sup>-3</sup> (Rollán y Bachmeir, 2014). Si bien las muestras de suelo se tomaron en 6 oportunidades durante el ciclo, la última fecha arrojó valores erráticos en razón de la continuidad de las lluvias de modo que fue descartada.

La CC se obtuvo a partir de fotografías adquiridas con una cámara Canon PowerShot SD780 IS, modificada para producir imágenes de NDVI (de la Casa et al., 2016a; b). Las fotografías se tomaron 3 m por encima del cultivo, altura que se mantuvo constante a lo largo del ciclo por medio de un dispositivo extensible. La obtención de CC para cada imagen se realizó diferenciando el suelo de la vegetación verde de acuerdo a un umbral  $y$ , a partir de la imagen binaria producida, se estableció el cociente entre la cantidad de píxeles con vegetación y el total, valor que se expresó como fracción (0-1) o porcentaje (0-100%).

## 2. Datos meteorológicos y procedimiento para estimar $ET_0$

Los datos meteorológicos registrados en 2014-2015 por una estación automática ubicada en la proximidad del lote, además de proveer los registros de precipitación ( $PP$ ), permitieron obtener la información meteorológica completa durante el ciclo de cultivo, incluida la evapotranspiración de referencia calculada con el método de Penman-Monteith ( $ET_0$ ) (Allen et al., 1998). Asimismo, a partir de los datos de temperatura máxima ( $T_x$ ) y temperatura mínima ( $T_n$ ) se desarrolló un procedimiento para estimar diariamente  $ET_0$ , que se verificó posteriormente con registros de la misma estación obtenidos en 2013-2014. El modelo propuesto tiene la ventaja de estimar  $ET_0$  utilizando exclusivamente esta información térmica que, por lo general, resulta más accesible y presenta mayor difusión temporal y espacial. En este sentido, con la expectativa

de disponer de una serie extendida en el tiempo que fuera apropiada para el estudio, se utilizaron los datos de  $T_x$  y  $T_n$  de la estación Córdoba Observatorio (31° 24' lat. Sur, 64° 11' long. Oeste, 425 m snm) para estimar los valores diarios de  $ET_0$  entre 1960 y 2013.

El procedimiento para obtener  $ET_0$  se formuló a partir de un análisis de regresión múltiple que utilizó, además de  $T_x$  y  $T_n$ , un conjunto de variables elaboradas a partir de ellas. Las variables utilizadas fueron: temperatura media [ $T_m = (T_x + T_n) * 0,5$ ], amplitud térmica [ $AT = T_x - T_n$ ], y la radiación solar recibida ( $RSr$ ). El valor de  $RSr$  se obtuvo del producto entre la radiación astronómica ( $RSa$ ) y la transmisividad atmosférica ( $t$ ) que se calculó de acuerdo a la expresión de Bristow y Campbell (1984). A partir de  $AT$  para representar la condición de nubosidad, el modelo exponencial utilizó un conjunto de parámetros de ajuste local obtenidos por de la Casa et al. (2003):

$$t = a[1 - e^{(-bxAT)^c}] \quad (5)$$

Siendo 0,68; 0,03 y 1,7 los valores que asumen  $a$ ,  $b$  y  $c$  para la ciudad de Córdoba, respectivamente.

La  $RSa$  diaria se calculó a partir de las expresiones de Duffie y Beckman (1980), para la latitud del lugar y utilizando una constante solar de 1367 W m<sup>-2</sup>. De esta forma, se dispuso de un conjunto de variables predictoras potenciales para estimar  $ET_0$  que, de acuerdo al comportamiento no lineal observado, también se expresaron en forma cuadrática. Este conjunto de variables predictoras se depuró de manera progresiva procediendo a eliminar aquellas candidatas que carecían de significación estadística.

A los efectos de determinar la eficiencia en el uso de la radición ( $EUR$ ) a partir de la ecuación (1), los valores de  $RSFAI$  fueron acumulados entre siembra y cosecha, asumiendo el valor de cobertura del cultivo ( $CC$ ) como sucedáneo de la fracción de intercepción, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$RSFAI = \sum_s^c (Rsr \times 0,5 \times CC) \quad (6)$$

Por su parte, para determinar la productividad del agua ( $WP$ ) mediante la ecuación (2), la cantidad de agua transpirada diariamente durante el ciclo en condiciones potenciales se obtuvo a partir de la siguiente expresión:

$$T = ET_0 \times Kc \times CC \quad (7)$$

El valor del coeficiente de cultivo ( $Kc$ ) que se uti-

lizó para determinar la evapotranspiración máxima en soja ( $ET_{max} = ET_0 \times Kc$ ), se obtuvo siguiendo el procedimiento de Gardiol et al. (2002). Este método emplea una fracción de tiempo térmico estacional como variable independiente que se obtiene a partir del método residual con una temperatura base de 11°C, similar al método de suma de temperatura utilizado por AquaCrop. De acuerdo a Raes et al. (2009), el valor observado de CC permite, en este caso, disociar la evapotranspiración entre el agua que evapora la superficie del suelo de la que transpira el cultivo.

### 3. Empleo del modelo de cultivo AquaCrop

El modelo AquaCrop dispone de distintas presentaciones y alternativas de uso que se exploraron de manera particular en este trabajo. En primer término, los valores de cobertura del cultivo, biomasa y agua del suelo monitoreados a campo durante el ciclo de cultivo de la soja 2014-2015 se incorporaron como registros observados a los efectos de contraste estadístico con respecto a las estimaciones del modelo.

Al permitir efectuar corridas sucesivas de múltiples años y una vez calibrado para las condiciones edáficas, tecnológicas y de manejo del cultivo de soja, AquaCrop se ejecutó para simular cada año los valores de rendimiento (R) y, bajo el mismo contexto productivo pero sin restricciones hídricas, el rendimiento potencial (Rp) a fin de determinar la brecha (Br). En este sentido, el modelo se corrió bajo la modalidad secuencial, de modo que la humedad del suelo inicial de cada ciclo productivo queda definida por la dinámica particular de entradas y salidas de agua que la rutina de balance computa de manera ininterrumpida. A los efectos de compatibilizar la influencia de la temperatura en la duración de los procesos de desarrollo, el modelo se utilizó bajo la modalidad temporal de grados días, considerando una temperatura base de 11 °C y un límite térmico superior de 30°C.

Por su parte, a los efectos de representar el escurrimiento de agua en el lote el modelo utilizó un valor fijo de Curva Número (CN=70) y, para simular la redistribución del agua en cada sector se consideró, por un lado, un manejo uniforme y, por el otro, un manejo variable supeditado a particulares condiciones superficiales en los diferentes sitios. Este recurso se utilizó en especial para ajustar con mayor detalle la información de la humedad de suelo.

En el cálculo de la producción de biomasa, la ecuación 4 del modelo AquaCrop considera la influencia del incremento de la concentración del CO<sub>2</sub> atmosférico a lo largo del tiempo sobre el valor

de productividad del agua (Steduto et al., 2007). A tal efecto, WP se multiplica por un coeficiente de corrección cuyo valor depende de la concentración de CO<sub>2</sub> de cada año en particular respecto a la concentración del año 2000. De acuerdo al incremento sostenido que registra el contenido atmosférico de CO<sub>2</sub> este procedimiento produce un efecto de tendencia sobre las estimaciones de productividad que, si bien refleja el aumento de los niveles de CO<sub>2</sub>, no contribuye a esclarecer la influencia en particular de las condiciones climáticas. De esta forma, los valores de rendimiento que estima AquaCrop fueron expresados tomando como referencia la concentración de CO<sub>2</sub> del año 2000.

De acuerdo a la disponibilidad de información meteorológica entre 1960 y 2012, la condición del riesgo climático para el cultivo de soja en secano se evaluó asumiendo diferentes alternativas en relación a la decisión de siembra. A los efectos de establecer algunos escenarios posibles, en primer término se consideró un esquema fijo de tres fechas los días 15 de octubre, noviembre y diciembre, respectivamente. Además, con el propósito de evaluar una recomendación de siembra basada en información meteorológica previa, se consideraron otros tres escenarios que, con posterioridad al 20 de setiembre, retrasan la siembra hasta totalizar 50 mm, 100 mm y 150 mm de lluvia, respectivamente.

### 4. Evaluación estadística

Los datos de  $ET_0$  que registró la estación automática próxima al lote asumieron el carácter de observados en tanto los obtenidos con el modelo de regresión constituyen los valores estimados. El modelo de regresión se desarrolló a partir de la información registrada durante el periodo de calibración en 2014-2015, en tanto su desempeño predictivo se evaluó con los datos meteorológicos de 2013-2014.

Por su parte, la evaluación estadística para valorar la magnitud del error entre los datos observados y estimados por AquaCrop se realizó a partir de los distintos indicadores que utiliza la plataforma, esto es: Coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), Raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), Raíz cuadrada del error cuadrático medio normalizada (NRMSE), Coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (EF) e Índice de concordancia refinado de Willmott (dr) (Willmott, 2012). El criterio de ajuste aplicado para representar el cultivo de soja consistió en realizar la evaluación de valores observados y estimados de una manera integrada, tanto en relación a los distintos sectores del lote como de las variables biométricas utilizadas.

Finalmente, el conjunto de 6 escenarios/tratamientos se clasificó con respecto al valor medio ( $Br_M$ ) y el desvío estándar ( $Br_{DE}$ ) de  $Br$ , estableciendo 4 categorías: con valores por debajo tanto de  $Br_M$  como de  $Br_{DE}$  (Baja y Estable); con valores por encima tanto de  $Br_M$  como de  $Br_{DE}$  (Alta e Inestable), y sus correspondientes combinaciones (Baja e Inestable y Alta y Estable) (Blackmore et al., 2003). Posteriormente, se realizó un análisis de varianza a los efectos de establecer diferencias entre medias para analizar la fecha de siembra más conveniente en la región.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1. Obtención de $ET_o$ entre 1960 y 2013

Los registros de  $ET_o$  obtenidos durante el monitoreo de la soja en 2014-2015 se utilizaron como variable dependiente de un modelo de regresión lineal múltiple (RLM) que empleó, además de datos diarios de  $T_x$  y  $T_n$ , un conjunto de términos independientes obtenidos a partir de ellos, que se expresaron tanto en forma lineal como cuadrática. Luego de un proceso de depuración en función de la significación estadística de cada término, y de la prueba de verificación realizada a partir de la información meteorológica de 2013-2014, se obtuvo el modelo de RLM cuyos términos y demás estadísticos muestra la Tabla 2. Por su parte, el análisis de la relación entre los valores de  $ET_o$  y los estimados a partir del modelo de RLM, tanto en 2014-2015 como la verificación en 2013-2014, se muestran en la Figura 2.

El modelo propuesto para estimar  $ET_o$  muestra resultados consistentes, con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,81 y un valor de la raíz cuadrada del error cuadrático medio de 0,86 mm d<sup>-1</sup> en la etapa de desarrollo que, si bien se reduce en la prueba de verificación a 0,72 y aumenta a 1 mm d<sup>-1</sup>, respectivamente, muestra rectas de ajuste muy semejantes a la función de identidad, en particular cuando el modelo fue verificado. Asimismo, la prueba de comparación de medias apareadas en ambos casos indica que tampoco existen diferencias entre los valores calculados y estima-

dos. Aunque las curvas muestran una ligera tendencia del modelo a subestimar, la dispersión se presenta distribuida de manera uniforme respecto a la función identidad para todo el rango entre 0 y 10 mm por día. A partir de este procedimiento de cálculo, y disponiendo de los registros de  $T_x$  y  $T_n$  de la estación Córdoba Observatorio desde 1960 hasta 2013, se realizó la estimación de los valores diarios de  $ET_o$ , teniendo en cuenta que el eventual error cometido al extrapolar se minimiza en virtud de la escasa distancia que separa a ambos sitios.

### 2. Calibración de AquaCrop para el cultivo de soja en seco

#### 2.1 Evaluación de la productividad del agua (WP)

Desde su aparición en 2009, el modelo AquaCrop se ha utilizado para representar el crecimiento, desarrollo y productividad de distintos cultivos bajo diversos ambientes y condiciones de manejo. En maíz (Henget et al., 2009; Hsiao et al., 2009; Abedinpour et al., 2012), algodón (Farahani et al., 2009), trigo (Andarzian et al., 2011; Mkhabela and Bullock, 2012; Iqbal et al., 2014), existe información abundante que se puede considerar inicialmente para calibrar AquaCrop de manera específica. No ocurre lo mismo con el cultivo de soja, que ha sido aparentemente menos explorado a tal efecto.

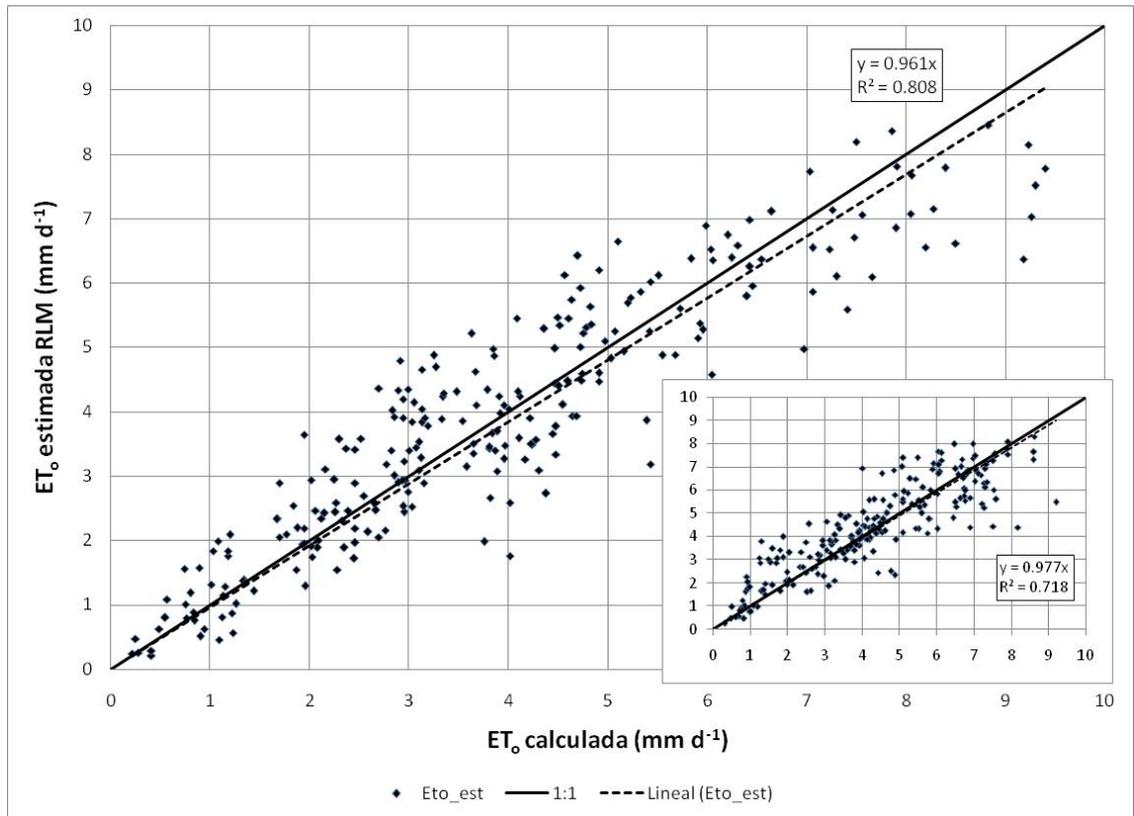
Un aspecto central de la calibración de AquaCrop consiste en adoptar el valor adecuado de WP a fin de calcular la ecuación (3). Ante la ausencia de valores de WP de carácter experimental para la soja en la región central de Córdoba, se optó por utilizar de manera preliminar la determinación obtenida a partir del monitoreo en 2014-2015 que presentó valores de rendimiento elevados como se indica más adelante en este mismo punto. Esta definición es relevante en vistas a utilizar un valor potencial de productividad a partir del cual la  $Br$  de la soja represente una estimación razonable.

La Figura 3a presenta la relación lineal entre las mediciones de biomasa aérea relevada en los distintos sectores del lote a lo largo del ciclo y al valor de la transpiración acumulada normalizada respecto a la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ), a los efectos de obtener una aproximación experi-

**Tabla 2.** Coeficientes de regresión y estadísticos asociados del modelo para estimar la evapotranspiración de referencia de Penman-Monteith ( $ET_o$ ) obtenidos durante el período de desarrollo.

Variable	Coefficiente	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
$Tm^2$	0,00901213	0,00090162	9,99551828	6,8339E-20
$Tn^2$	-0,00906535	0,00111002	-8,16682435	1,8057E-14
$RSr^2$	0,00467608	0,00040519	11,540349	8,4555E-25

Referencias: Valores diarios de temperatura media ( $Tm$ ), temperatura mínima ( $Tn$ ) y radiación solar recibida ( $RSr$ ).

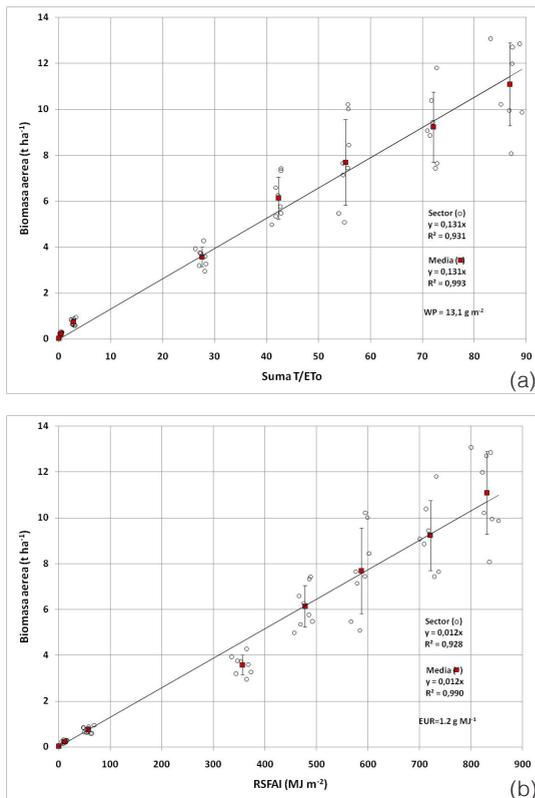


**Figura 2.** Valores de evapotranspiración de referencia de Penman-Monteith ( $ET_0$ ) calculados y estimados a partir del modelo de regresión lineal múltiple (RLM) durante 2014-2015. Inserta la dispersión correspondiente a la etapa de verificación con datos de 2013-2014. La figura muestra también la recta de regresión y el coeficiente de determinación obtenidos en cada caso.

mental de WP. Esta determinación, que alcanza un valor de  $13,1 \text{ g m}^{-2}$  para el conjunto completo de la información registrada, se considera moderada ya que, en algunos sectores del lote la productividad presenta valores aún superiores. Dicho valor resulta ligeramente inferior al utilizado por Rodrigues da Silva et al. (2018) que calibraron y validaron el modelo AquaCrop para soja con distintos niveles de riego en Brasil, empleando valores de WP de  $15,5 \text{ g m}^{-2}$ .

Para dar respaldo a esta información, el crecimiento potencial de la soja también se analizó a partir del concepto de eficiencia en el uso de la radiación (EUR), procedimiento de cálculo alternativo que se presenta relativamente más generalizado (de la Casa et al., 2014). La Figura 3b muestra el modelo de regresión lineal obtenido por correlación y regresión entre los mismos datos de materia seca relevados en distintos sectores del lote como variable dependiente respecto a la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la soja

durante el ciclo estimada a partir de CC. La pendiente lineal de esta recta de ajuste corresponde a la EUR que, para el conjunto completo de la información del lote, resultó de  $1,2 \text{ g MJ}^{-1}$ . Este valor resulta ligeramente inferior a los citados para soja en ausencia de restricciones hídricas y nutricionales, con un rango entre  $1,3 \text{ g MJ}^{-1}$  y  $2,4 \text{ g MJ}^{-1}$  de radiación fotosintéticamente activa interceptada (Sinclair and Muchow, 1999; Purcell et al., 2002). Van Roekel and Purcell (2014), por su parte, observaron valores de EUR entre  $1,46 \text{ g MJ}^{-1}$  y  $1,89 \text{ g MJ}^{-1}$  para variedades de soja más recientes. La EUR obtenida para el lote en su conjunto resulta algo inferior a los valores que reporta la bibliografía, acrecentando la evidencia de que el cultivo de soja en 2014-2015, a pesar de la muy adecuada disponibilidad de agua (de la Casa et al., 2017 en prensa), experimentó alguna restricción en la producción de biomasa. El exceso de lluvia puede ser en parte responsable de la merma producida, así como la distribución desuniforme del escurrimiento superficial de agua originada por el microrelieve.



**Figura 3.** (a) Relación entre la biomasa aérea de soja relevada en distintos sectores del lote monitoreado en 2014-2015 y el valor acumulado de la transpiración (T) normalizado por la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ), para determinar el valor de la productividad del agua (WP). (b) Idem anterior pero con relación a la radiación solar fotosintéticamente activa interceptada (RSFAI) para obtener el valor de la eficiencia en el uso de la radiación (EUR). La figura presenta los valores de cada sector individual (círculo hueco), como así también del promedio para el lote (cuadrado lleno) y la barra que indica +/- el desvío estándar.

El cultivo de soja monitoreado en 2014-2015 presentó rendimientos elevados y muy uniformes en el lote de acuerdo, tanto a la información del mapa de rendimiento, con un valor medio de  $5068 \text{ kg ha}^{-1}$  y un desvío estándar de  $\pm 819 \text{ kg ha}^{-1}$ , considerando sólo el 96% central de la distribución empírica de los datos de rendimiento, como así también las observaciones realizadas en los 16 sectores de muestreo para una densidad uniforme establecida por conteo ( $5467 \text{ kg ha}^{-1} \pm 702$ , respectivamente). Por su parte, el rendimiento en el sector de mayor productividad alcanzó  $6566 \text{ kg ha}^{-1}$ , valor comprendido entre aquellos registrados en ambientes donde la soja presenta un rendimiento máximo (van Roekel and Purcell, 2014). Por su parte, la prueba de la diferencia de medias apareadas entre los valores de rendimiento observados y los estimados por AquaCrop, tanto con un valor de CN constante en el lote

como para condiciones de manejo variables en los 8 sectores de muestreo intensivo, no arrojó diferencias significativas. En vistas a catalogar el potencial productivo de la soja en la región, el modelo AquaCrop se calibró aprovechando la variabilidad observada en los 8 sectores que se monitorearon en el lote de manera más exhaustiva. Este análisis propone establecer la capacidad predictiva de la herramienta de estimación que se utiliza luego para determinar la variabilidad temporal tanto de la productividad real como potencial en la región.

## 2.2 Calibración bajo condiciones edáficas uniformes

A partir de la rutina de calibración y ajuste que provee la misma plataforma de AquaCrop, el procedimiento de calibración se implementó analizando las diferencias a lo largo del ciclo entre valores observados y estimados de la cobertura del cultivo (CC), la biomasa total (B) y el contenido de agua del suelo (AS). Para representar el comportamiento del cultivo en los distintos sectores del lote el modelo utilizó, en una primera etapa de aproximación, las mismas condiciones meteorológicas, igual tipo de suelo (con una curva número  $CN=70$ ) e idénticas prácticas de manejo, considerando condiciones de secano y sin restricciones por fertilidad. De esta forma, la única diferencia establecida para determinar un comportamiento diferente entre los sectores se circunscribe a la información del contenido inicial de agua del suelo, de acuerdo a las mediciones que se realizaron al momento de la siembra. La evaluación estadística produjo los resultados de error que muestra la Tabla 3.

Excepto para la materia seca estimada en S6, que produjo un índice de Nash-Sutcliffe de 0,32 y en S3 donde EF fue 0,76, los coeficientes de la Tabla 3 corroboran que el modelo estima con mucha precisión tanto los valores de CC como de la materia seca producida en los distintos sectores del lote, con valores siempre próximos o por encima de 0,8. Distintos son los resultados con respecto al agua del suelo, ya que los indicadores reflejan un desempeño de estimación muy deficiente en este caso. Sólo el valor de Willmott presenta en algunos sectores cierta aproximación a corroborar la identidad entre valores observados y estimados del contenido de agua al metro de profundidad.

La evaluación en particular del balance de agua pone de manifiesto que las diferencias entre el agua del suelo observada y calculada por AquaCrop redundan en una dispersión considerable, como revelan los bajos valores de  $R^2$ , EF y dr. Esto se explica, en parte, por el fuerte carácter local que tiene la medición del agua del suelo y un muestreo

**Tabla 3.** Valoración estadística de la relación entre valores observados de cobertura del cultivo, materia seca y contenido de agua del suelo del perfil hasta 1,0 m y estimados por AquaCrop en los sectores monitoreados del lote de soja en Córdoba, durante el ciclo 2014-2015.

Sector	Parámetros estadísticos	Cobertura del cultivo (%) (n=10)	Materia seca (Kg ha <sup>-1</sup> ) (n=7)	Agua del suelo (mm) (n=5)
S1	R <sup>2</sup>	0,993	0,950	0,302
	EF	0,993	0,893	-0,924
	dr	0,975	0,895	0,219
	RMSE	3,379	1,530	19,755
	NRMSE	5,357	31,294	7,127
S3	R <sup>2</sup>	0,982	0,968	0,414
	EF	0,955	0,761	-4,331
	dr	0,904	0,820	-0,143
	RMSE	8,366	1,830	31,209
	NRMSE	12,968	45,648	12,261
S6	R <sup>2</sup>	0,974	0,933	0,085
	EF	0,974	0,323	-0,293
	dr	0,942	0,708	0,437
	RMSE	6,468	2,836	28,075
	NRMSE	10,107	74,147	11,235
S8	R <sup>2</sup>	0,941	0,941	0,194
	EF	0,920	0,861	-0,897
	dr	0,916	0,858	0,185
	RMSE	11,413	1,526	14,877
	NRMSE	17,269	39,519	5,928
S9	R <sup>2</sup>	0,996	0,935	0,078
	EF	0,992	0,841	-3,381
	dr	0,960	0,846	0,110
	RMSE	3,794	1,757	20,763
	NRMSE	6,201	41,048	9,018
S11	R <sup>2</sup>	0,910	0,968	0,638
	EF	0,895	0,894	0,264
	dr	0,900	0,873	0,644
	RMSE	13,432	1,442	15,463
	NRMSE	20,595	32,269	6,580
S14	R <sup>2</sup>	0,941	0,963	0,142
	EF	0,873	0,917	-1,322
	dr	0,857	0,892	0,232
	RMSE	14,689	1,175	29,671
	NRMSE	22,930	28,984	13,462
S16	R <sup>2</sup>	0,947	0,973	0,020
	EF	0,946	0,873	-2,737
	dr	0,929	0,842	0,166
	RMSE	9,521	1,609	24,259
	NRMSE	14,816	36,089	9,548

Referencias. R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación; RMSE: Raíz cuadrada del error cuadrático medio; NRMSE: Raíz cuadrada del error cuadrático medio normalizado; EF: Coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe; dr: Índice de concordancia refinado de Willmott.

relativamente escaso, como así también porque los aportes de agua de lluvia fueron abundantes y frecuentes a lo largo del ciclo, especialmente durante febrero y marzo de 2015, de modo que la continua reposición no sólo mantuvo el contenido de agua siempre en niveles relativamente eleva-

dos, sino que también se tornó favorable para producir escurrimiento superficial. De esta forma, se desprende que la simulación del balance de agua a partir de condiciones edáficas y de escurrimiento uniformes, impide representar el eventual proceso de redistribución de agua en el lote (Garrison et

al., 1999) y repercute de manera negativa sobre la estimación del contenido de agua.

### 2.3 Calibración bajo diferentes condiciones de escurrimiento

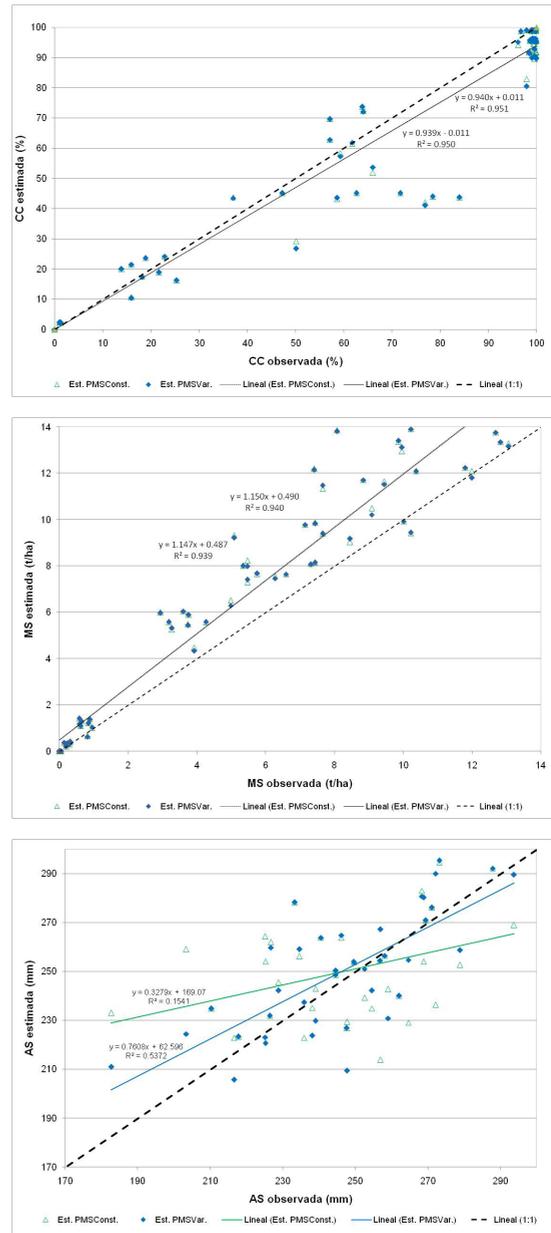
En procura de lograr que la evidencia converja simultáneamente para los tres aspectos evaluados del cultivo (CC, MS y AS), la calibración y ajuste de AquaCrop, en esta segunda instancia, considera condiciones de escurrimiento particulares para cada sector del lote. A los efectos de expresar diferencias vinculadas a la infiltración, percolación y redistribución del agua del suelo (Basso, 2000; Batchelor et al., 2002), como fuera planteado en una evaluación anterior en el mismo lote (de la Casa et al., 2016b), la capacidad de escurrimiento de agua en cada sector se ajustó de manera particular. Para ello, aprovechando que en el módulo de prácticas de manejo superficial AquaCrop permite alterar la velocidad de escurrimiento, el aumento o disminución puntual del valor de CN permitió hacer la corrección en cada caso. La Figura 4 muestra los resultados observados de cobertura, biomasa y agua del suelo y los correspondientes valores estimados utilizando en todos los sectores del lote un valor de CN fijo (70), pero bajo diferentes condiciones de manejo superficial de la cobertura en cada uno de ellos.

La modificación de las prácticas de manejo diferencial del escurrimiento en cada sector de muestreo mejora substancialmente el ajuste entre valores observados y estimados del agua edáfica, que se pone en evidencia por un coeficiente angular más cercano a la unidad, en tanto el  $R^2$  de 0,14 se incrementa a 0,54. Por otra parte, estas modificaciones no alteran mayormente los resultados para CC y biomasa, incluso mejorando ligeramente su estimación.

## 3. Evaluación de la brecha de rendimiento de soja en seco y bajo distintas opciones de siembra

### 3.1 Fecha de siembra fija (22 de noviembre)

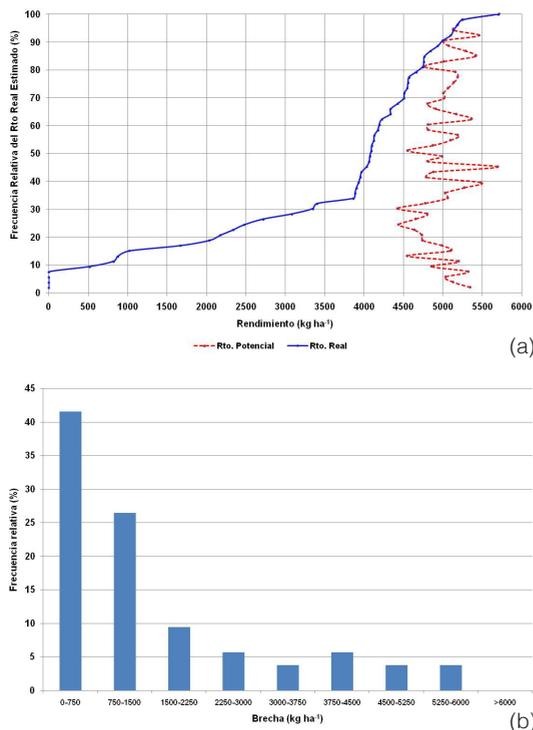
Visto el comportamiento diferencial de cada sector, principalmente como resultado del proceso de redistribución del agua, a los efectos de evaluar la brecha de rendimiento a escala regional se procedió a utilizar la información de calibración de AquaCrop correspondiente a un valor promedio del lote y considerando cada año una fecha de siembra fija igual a la utilizada en la calibración (22 de noviembre). A partir de la serie de  $ET_0$  y los registros de lluvia observados para el periodo



**Figura 4.** Relación entre los valores observados de cobertura del cultivo (CC), materia seca (MS) y agua del suelo a 1 m de profundidad (AS) y estimados con AquaCrop para una CN fija de 70 con un manejo uniforme (triángulos vacíos) y variable (círculos llenos) en cada sector del lote.

1960-2012, se estimaron los rendimientos de soja de carácter real (R) y potencial (Rp) que muestra la Figura 5a, ordenados en términos de frecuencia relativa acumulada de R. La Figura 5b, en tanto, presenta el histograma de frecuencias para la Br del cultivo de soja.

Dependiendo de la longitud del ciclo y las con-



**Figura 5.** (a) Rendimientos de soja estimados con AquaCrop para condiciones reales (ordenados en términos de la frecuencia relativa acumulada), con el respectivo valor potencial de cada año en Córdoba, Argentina, empleando el 22 de noviembre como fecha de siembra. (b) Histograma de frecuencia relativa de la brecha de rendimiento del cultivo de soja estimada entre 1960 y 2012.

diciones de demanda atmosférica de cada año, la serie de rendimiento potencial fluctúa aproximadamente entre algo menos de 4500 y algo más de 5500 kg ha<sup>-1</sup>. Van Roekel and Purcell (2014) reportaron para soja un rango de rendimientos potenciales de carácter experimental comprendido entre 5290 y 7953 kg ha<sup>-1</sup>, siendo un poco más amplio y superior que las estimaciones de este trabajo. Por su parte, los valores estimados de carácter real oscilan entre un poco menos de 10% de casos nulos y, en el extremo superior, alcanzando rindes que superan 5500 kg ha<sup>-1</sup>.

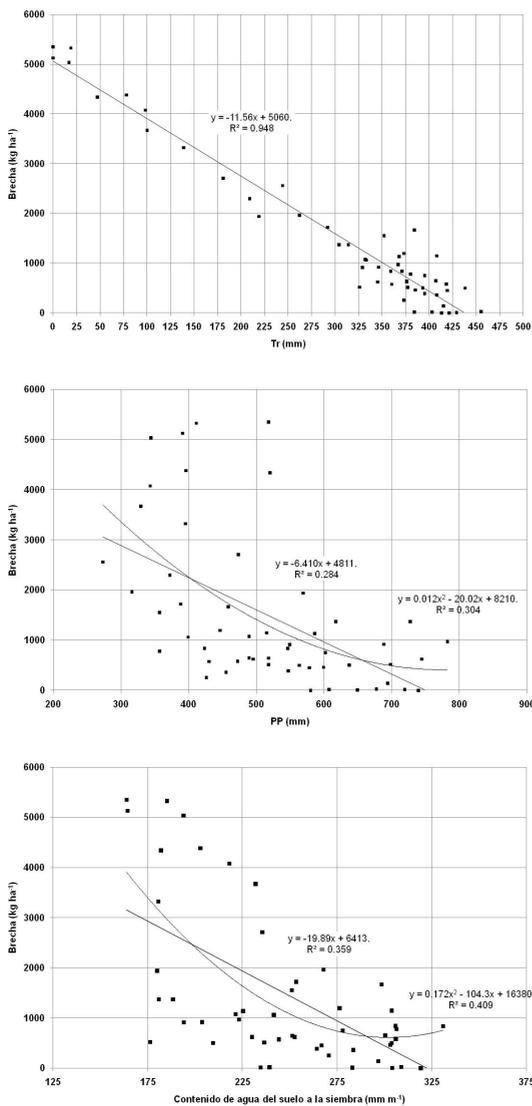
De acuerdo a la Figura 5b, para esta fecha de siembra fija el cultivo de soja presentaría reducciones relativamente bajas de la productividad (menores a 1500 kg ha<sup>-1</sup>) en alrededor de 69% de los años, que se asocian a condiciones meteorológicas más favorables durante el ciclo. Luego, la brecha incrementa su valor bajo condiciones climáticas cada vez más limitantes, en tanto que su frecuencia se reduce. Sólo en aproximadamente un tercio de los ciclos las brechas productivas ponen de manifiesto restricciones climáticas más

severas.

Considerando que AquaCrop evalúa la productividad poniendo el énfasis en la cantidad de agua transpirada por el cultivo, la Br presenta una relación estrictamente lineal de carácter inversa respecto a la transpiración acumulada durante el ciclo, como muestra la Figura 6a. La disponibilidad de agua en los ambientes semiáridos y subhúmedos tendiente a reducir Br es un factor decisivo para la producción agrícola en general (Anderson, 2010; van Iterssun et al., 2013) y la soja en particular (Bhatia et al., 2008). En secano esta disponibilidad de agua depende de dos fuentes de aprovisionamiento: la almacenada en el perfil al momento de la siembra y la que aporta la lluvia durante el ciclo. Mientras la Figura 6b presenta la relación de la precipitación acumulada durante el ciclo con respecto a la brecha de la soja estimada con AquaCrop, la Figura 6c hace lo propio pero en función al contenido de agua del suelo previo a la siembra.

Si bien la relación entre Br y la precipitación durante el ciclo permite reconocer una tendencia negativa previsible, la gran dispersión de los datos reduce la proporción de variabilidad explicada a sólo 28% y 30%, dependiendo del modelo de ajuste. El agua que aporta la lluvia durante el ciclo resulta un indicador relativamente menos preciso de la productividad. La dispersión que muestra la Figura 6(b) pone de manifiesto la influencia de distintos factores intrínsecos de la lluvia, como la intensidad pluviométrica, y extrínsecos, como la capacidad de infiltración del suelo y la topografía del lote, sobre la efectividad del fenómeno en términos de su aprovechamiento para el cultivo.

Por su parte, el contenido de agua almacenado a la siembra, además de expresar un comportamiento inverso lógico, ya que un mayor contenido de agua inicial reduce el valor de Br, mantiene una buena capacidad para explicar la variabilidad de la productividad estimada. Cuando el suelo almacena una cantidad elevada de agua la brecha tiende a presentar valores reducidos. En cambio, si el almacenaje previo es más escaso, la línea de tendencia (función de ajuste) permite separar dos situaciones, diferenciando los casos que conservan una brecha reducida porque la precipitación durante el ciclo no es limitante, de aquellos ciclos en que, además del comienzo con una reserva inicial reducida, la lluvia durante su transcurso también resulta escasa, lo que acrecienta la brecha de manera considerable. De esta forma, se destaca la importancia fundamental del agua almacenada previa a la siembra a los efectos de contribuir a reducir cada año las pérdidas de productividad.



**Figura 6.** Relación de la brecha de rendimiento estimada con AquaCrop con (a) el agua total transpirada durante el ciclo; (b) la lluvia acumulada y (c) el contenido de agua a la siembra (1 m de profundidad).

### 3.2 Evaluación del efecto de distintas fechas de siembra sobre la brecha

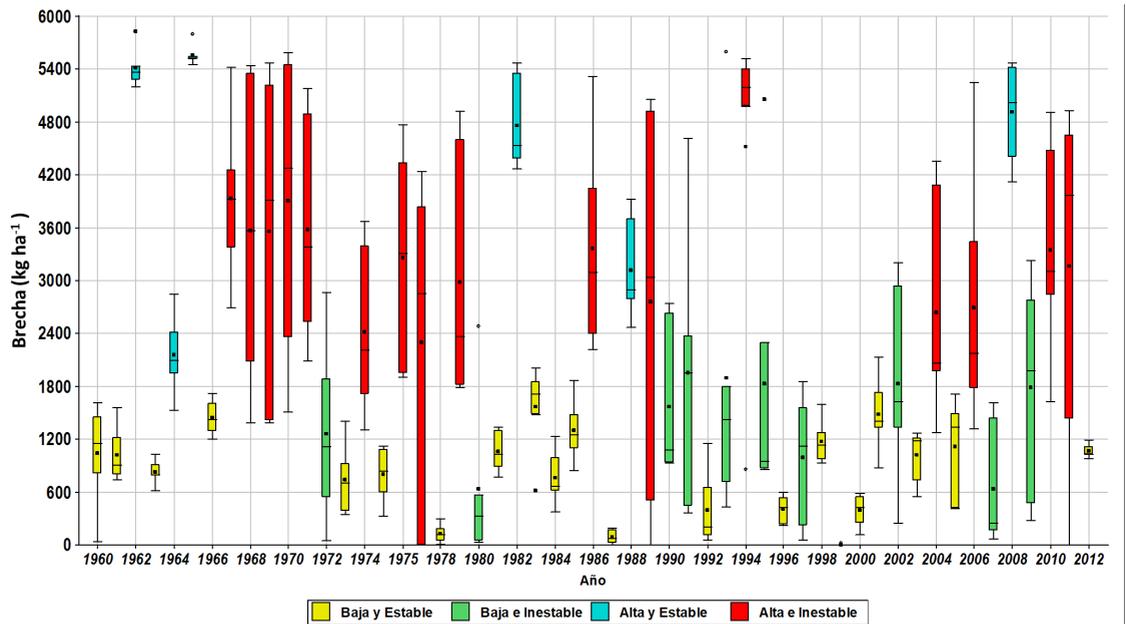
Teniendo en cuenta la importancia decisiva de la disponibilidad de agua sobre la productividad de la soja (Sadras y Calviño, 2001), y de acuerdo a la capacidad de AquaCrop para expresar esta influencia, se analizan distintas alternativas de siembra a fin de dilucidar la influencia de un eventual adelanto/atraso de la fecha sobre la brecha de rendimiento. En primer término se analiza el impacto

de un cambio en la fecha de siembra, evaluando 3 fechas fijas cada año: una más adelantada el 15 de octubre, otra próxima a la fecha de la calibración el 15 de noviembre y la más atrasada el 15 de diciembre.

Por otra parte, considerando los resultados de la Figura 6c respecto a la importancia del agua almacenada a la siembra y teniendo en cuenta que, en regiones con un régimen de lluvias monzónico como el área central de Córdoba, Argentina (González and Barros, 1998), el comienzo de la estación de lluvias es errático y muy variable cada año (de la Casa, 2009), se procedió a evaluar distintas fechas de siembra ligadas a la ocurrencia de lluvias previas que permitan iniciar el cultivo con diferentes contenidos de agua. En este sentido, la alternativa de atrasar la siembra basado en la cantidad y continuidad de las lluvias que dan inicio al periodo húmedo tiene una connotación prescriptiva más racional, ya que la recomendación se formula de acuerdo a las condiciones meteorológicas de cada ciclo productivo en particular y empleando información que puede reducir la pérdida de productividad.

Los valores medios, desvío estándar y casos extremos de Br que se produce cada año entre 1960 y 2012 se presentan en la Figura 7 para las 6 alternativas de siembra evaluadas. Como se indicó antes, esta información se clasificó cada año de acuerdo a dos criterios: los casos por debajo y por encima del valor medio general, como así también aquellos inferiores y superiores al valor medio de la desviación estándar. Por su parte, el primer criterio evalúa el potencial productivo de cada ciclo, con brechas pequeñas (grandes) que son indicativas de condiciones de demanda de agua mejor (peor) satisfechas, el segundo establece en qué medida la decisión de siembra puede impactar de manera significativa. Mientras el desvío estándar reducido expresa un resultado productivo más uniforme cada año y, de esta forma, independiente de la decisión de siembra, los desvíos más elevados caracterizan aquellos años cuando esta decisión ejerce una influencia marcada sobre las diferencias de rendimiento obtenidas.

Como se aprecia en la Figura 7, existe una gran variabilidad a lo largo del tiempo respecto a las distintas consecuencias productivas que cada año promueven tanto la condición meteorológica previa y durante el ciclo del cultivo, como así también la oportunidad de siembra. En este sentido, el anava que muestra la Tabla 4, indica la ausencia de diferencias significativas entre la decisión de siembra (tratamientos) para el conjunto completo de los datos analizados.



**Figura 7.** Variación de la brecha de rendimiento del cultivo de soja entre 1960 y 2012 de acuerdo a las 6 alternativas de siembra evaluadas en la región central de Córdoba, Argentina, y clasificadas de acuerdo al valor medio y desvío estándar de todo el conjunto. Referencias: Baja/Alta (inferior/superior a la brecha media); Estable/Inestable (inferior/superior al desvío estándar medio).

En procura de una interpretación de los resultados más utilitaria, los casos con un desvío reducido (estables) representan condiciones climáticas (favorables (en amarillo) o desfavorables (en celeste)) bajo las cuales la decisión de siembra no altera en gran medida el resultado productivo, de modo que este conjunto de 27 casos no resulta intrínsecamente interesante de evaluar. En cambio, aquellos años de mayor desviación (inestables) corresponden a

escenarios productivos más diversos a propósito de la oportunidad de siembra (tanto favorables (en verde) como desfavorables (en rojo)), con algunas opciones de siembra menos oportunas que incrementan la brecha y otras, en cambio, que tienden a reducirla. En total los casos de interés son 26, cuyo estudio permite una selección más racional de la oportunidad de siembra, como muestra el análisis de la varianza de la Tabla 5.

**Tabla 4. Resultados del Análisis de la Varianza (SC tipo III) para el conjunto completo de casos**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	Cuadrado medio	F	p-valor
Modelo	8899480.01	5	1779896.00	0.59	0.7077
Tratamientos	8899480.01	5	1779896.00	0.59	0.7077
Error	941332640.84	312	3017091.80		
Total	950232120.85	317			

Test: DGC Alfa=0.10 PCALT=622.7258

Error: 4398833.4707 gl: 312

Tratamiento	Brecha media	n (años)	E.E.
15/12	1859.21	53	238.59a
150mmacu	1938.38	53	238.59a
100mmacu	2026.50	53	238.59a
15/11	2056.17	53	238.59a
50mmacu	2228.20	53	238.59a
15/10	2351.63	53	238.59a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.10$ ). DGC: Prueba de Di Rienzo, Guzmán y Casanoves (Di Rienzo et al., 2011).

Tabla 5. Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	Cuadrado medio	F	p-valor
Modelo	29567822.43	5	5913564.49	2.13	0.0645
Tratamientos	29567822.43	5	5913564.49	2.13	0.0645
Error	415792884.18	150	2771952.56		
Total	445360706.61	155			

Test:DGC Alfa=0.10 PCALT=802.1953

Error: 2771952.5612 gl: 150

Tratamiento	Brecha media	n (años)	E.E.
15/12	1984.17	26	326.52a
150 mm acu	2110.24	26	326.52a
100 mm acu	2498.41	26	326.52a
15/11	2542.84	26	326.52a
50 mm acu	2934.22	26	326.52b
15/10	3238.00	26	326.52b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.10$ ). DGC: Prueba de Di Rienzo, Guzmán y Casanoves (Di Rienzo et al., 2011).

El análisis estadístico para este subgrupo revela que la opción de siembra del 15 de octubre así como la de esperar una acumulación de 50 mm de lluvia desde el 20 de setiembre, son las alternativas que producen una brecha significativamente mayor ( $P < 0.10$ ) y, en consecuencia, deberían ser evitadas. Si bien las otras alternativas no arrojan diferencias significativas entre ellas, se destaca que la brecha resulta menor a medida que la siembra se retrasa, y esto es así tanto para el conjunto completo de los datos como para el subgrupo de mayor dispersión. La reducción de la brecha por efecto del atraso de la siembra se explica ya que esta dilación desplaza el ciclo de cultivo a la parte central de la estación de lluvias, cuando el fenómeno en la región es menos errático. La correspondencia de los valores medios de las brechas para las dos alternativas de siembra consideradas (a fecha fija o esperando acumular una cierta cantidad de lluvia), pone de manifiesto que la demora en sembrar tiende a producir una mayor acumulación de lluvia que, al incrementar el contenido de agua inicial, promueve la reducción de Br.

## CONCLUSIONES

El uso de AquaCrop a fin de estimar la brecha de rendimiento demanda la disponibilidad de una serie de registros de  $ET_0$  que, prolongada en el tiempo, de lugar a la manifestación de diferentes complejos climáticos. El procedimiento que estima  $ET_0$  por el método de Penman-Montieth-FAO, desarrollado sólo a partir de datos diarios de temperatura máxima y mínima, demostró ser una herramienta precisa para ese propósito. Junto a los datos pluviométricos, la disponibilidad preliminar de información ligada a la

demanda atmosférica permite estimar la brecha de rendimiento de la soja a lo largo del tiempo y evaluar el nivel de riesgo asociado principalmente a la falta de agua en la región central de Córdoba, Argentina.

En el modelo AquaCrop, la rutina que calcula la productividad vegetal basada en la eficiencia o productividad del agua (WP) se calibró para las condiciones climáticas, edáficas y tecnológicas de esta región cotejando los valores de cobertura del cultivo, biomasa y agua del suelo observados en un lote de soja en 2014-2015 y los respectivos valores estimados por el modelo. De acuerdo a los resultados experimentales el modelo utilizó un valor de WP de  $13,1 \text{ g m}^{-2}$  para estimar la producción de biomasa que, a pesar de la abundante disponibilidad hídrica ese año, puede resultar relativamente reducido. Esta apreciación se apoya en el valor también ligeramente bajo que resulta del análisis realizado a partir del concepto de eficiencia en el uso de la radiación.

El contraste entre valores observados y estimados por el modelo AquaCrop arrojó índices de precisión y error aceptables al evaluar la cobertura del cultivo, la biomasa total y el contenido de agua del suelo a lo largo del ciclo. Este control resultó particularmente más convincente cuando se consideraron condiciones de escurrimiento diferentes en los distintos sectores del lote.

Con el modelo calibrado para representar condiciones de cultivo propias de la región central de Córdoba, Argentina, y utilizando como fecha de siembra el 22 de noviembre, la brecha de rendimiento de la soja presenta valores inferiores a  $1500 \text{ kg ha}^{-1}$  en 69% de los ciclos, lo que acredita su potencial productivo en secano. La brecha productiva se incrementa a medida que las condiciones meteorológicas son más limitantes hasta que, para

algo menos de 10% de los casos, los rendimientos resultan nulos.

El análisis de distintas alternativas de siembra cada año muestra que en 51% (27/53) de los casos la decisión influye relativamente poco sobre el resultado productivo alcanzado, siendo la brecha en 38% (20/53) de ellos inferior al valor medio general. En el 49% restante el cambio de la oportunidad de siembra se expresa incrementado la dispersión de la brecha, lo que permite descartar las opciones relacionadas con las fechas de siembra más tempranas (15 de octubre y esperar una acumulación de 50 mm de lluvia desde el 20 de setiembre) y muestra la conveniencia de adoptar fechas más tardías (15 de diciembre y esperar acumular 150 mm de lluvia) para obtener Br más bajas.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Córdoba por el apoyo económico recibido para realizar esta investigación.

## REFERENCIAS

- Abedinpour, M., Sarangi, A., Rajput, T.B.S., Singh, M., Pathak, H., Ahmad, T. 2012. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agric. Water Manage.* 110(0):55–66.
- Abeledo, L.G., Savin, R., Slafer, G.A., 2008. Wheat productivity in the Mediterranean Ebro Valley: Analyzing the gap between attainable and potential yield with a simulation model. *Eur. J. Agron.* 28, 541–550.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. In: *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. FAO, Rome, Italy.
- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M.E., Barati, M.A., Rahnama, A. 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agric. Water Manage.* 100, 1–8.
- Anderson, W.K. 2010. Closing the gap between actual and potential yield of rainfed wheat. The impacts of environment, management and cultivar. *Field Crops Res.* 116, 14–22.
- Aramburu Merlos, F.A., Monzon, J.P., Mercuro, J.L., Taiboada, M., Andrade, F.H., Hall, A.J., ... & Grassini, P. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research* 184, 145–154.
- Basso, B. 2000. Digital terrain analysis and simulation modeling to assess spatial variability of soil water balance and crop production. Ph.D. Dissertation, Michigan State University, East Lansing, MI.
- Batchelor, W.D., Basso, B., Paz, J.O. 2002. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. *Europ. J. Agron.* 18, 141–158.
- Bhatia, V.S., Singh, P., Wani, S.P., Chauhan, G.S., Kesava Rao, A.V.R., Mishra, A.K., Srinivas, K. 2008. Analysis of potential yields and yield gaps of rainfed soybean in India using CROPGRO-Soybean model. *Agric. For. Meteorol.* 148, 1252–1265.
- Blackmore, S.; Godwin, R.J.; Fountas, S. 2003. The Analysis of Spatial and Temporal Trends in Yield Map Data over Six Years. *Biosystems Engineering* 84(4), 455–466.
- Bristow, K.L., Campbell, G.S. 1984. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agric. For. Meteorol.* 31, 159–166.
- Caldiz, D.O., Gaspari, F.J., Haverkort, A.J., Struik, P.C. 2001. Agro-ecological zoning and potential yield of single or double cropping of potato in Argentina. *Agric. For. Meteorol.* 109, 311–320.
- Cassman, K.G., Dobermann, A., Walters, D.T., Yang, H.S., 2003. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 28, 315–358.
- Constantin, J., Willaume, M., Murgue, C., Lacroix, B., Therond, O., 2015. The soil-crop models STICS and AqYield predict yield and soil water content for irrigated crops equally well with limited data. *Agric. For. Meteorol.* 206, 55–68.
- Dardanelli, J.D., Bachmeier, O.A., Sereno, R., Gil, R., 1997. Rooting depth and soil water extraction patterns of different crops in a silty loam Haplustoll. *Field Crop Res.* 54, 29–38.
- de la Casa, A., Ovando, G., Rodríguez, A., 2003. Estimación de la radiación solar global en la provincia de Córdoba, Argentina, y su empleo en un modelo de rendimiento potencial de papa. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 32(2), 1–17.
- de la Casa, A., 2009. Onset of the rainy season in the province of Córdoba (Argentina) determined by rainfall records and evaluation of its agricultural risk condition. *Chilean Journal of Agricultural Research* 69(4), 567–576.
- de la Casa, A., Ovando, G., Bressanini, L., Martínez, J., 2014. Estimación del rendimiento potencial de papa en Córdoba, Argentina, a partir de la eficiencia en el uso de la radiación y de la productividad del agua. *AGRISCIENCIA* 31(2), 75–91.
- de la Casa, A., Ovando, G., Bressanini, L., Martínez, J. 2016a. Empleo del NDVI de una cámara digital modi-

- ficada para estimar la cobertura del cultivo de papa bajo distintas condiciones de fertilización nitrogenada. *AGRISCIENTIA* 33(2), 75–88.
- de la Casa, A., Ovando, G., Bressanini, L., Martínez, J., Miranda, C., Díaz, G. 2016b. Evaluación de un lote de maíz bajo riego y siembra variable con el modelo AquaCrop en Córdoba, Argentina. *Revista Argentina de Agrometeorología* 7, 1–13.
- de la Casa, A., Ovando, G., Bressanini, L., Martínez, J., Díaz, G., Miranda, C. 2017. Soybean crop coverage estimation from NDVI images with different spatial resolution to evaluate yield variability in a plot. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. En prensa.
- Di Rienzo J.A.; Casanoves, F.; Balzarini, M.G.; Gonzalez, L.; Tablada, M.; Robledo, C.W. 2011. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1980. *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons, New York. 1-109 pp.
- Duvick, D.N., Cassman, K.G., 1999. Post-green revolution trends in yield potential of temperate maize in the North-Central United States. *Crop Sci.* 39, 1622–1630.
- Edwards, J.T., Purcell, L.C., 2005. Soybean yield and biomass responses to increasing plant population among diverse maturity groups: I. Agronomic Characteristics. *Crop Sci.* 45, 1770–1777.
- Evans, L.T., 1993. *Crop Evolution, Adaptation, and Yield*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- FAO, 2012. ETo Calculator version 3.2. Land and Water Digital Media Series N° 36. Reference Manual. FAO, Rome, Italy.
- Farahani, H.J., Izzi, G., Oweis, T.Y., 2009. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agron. J.* 101:469-476.
- Gardiol, J.M., Della Maggiora, A., Irigoyen, A., 2002. Curvas de coeficientes de cultivo de maíz, girasol y soja. IX Reunión Argentina de Agrometeorología. Córdoba, Argentina, 2002.
- Garrison, M.V., Batchelor, W.D., Kanwar, R.S., Ritchie, J.T., 1999. Validation of the CERES-Maize water and nitrogen balances under tile drained conditions. *Agric. Syst.* 62, 189-200.
- González, M., Barros, V., 1998. The relation between tropical convection in South America and the end of a dry period in Subtropical Argentina. *Int. J. Climatol.* 18, 1669-1685.
- Grassini, P., Thorburn, J., Burr, C., Cassman, K.G. 2011. High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt: I. On-farm yield, yield potential, and impact of agronomic practices. *Field Crops Res.* 120, 142–150.
- Grassini, P., Yang, H., Cassman, K.G., 2009. Limits to maize productivity in Western Corn-Belt: A simulation analysis for fully irrigated and rainfed conditions. *Agric. For. Meteorol.* 149, 1254-1265.
- Griffin, T.S., Johnson, B.S., Ritchie, J.T. 1995. A simulation model for potato growth and development: Substortato Version 2.0. IBSNAT Research Report Series 02. Dept. of Agronomy and Soil Science.
- Heng, L.K., Hsiao, T.C., Evett, S.R., Howell, T.A., Steduto, P. 2009. Testing of FAO AquaCrop model for rainfed and irrigated maize. *Agron. J.* 101:488-498.
- Hsiao, T.C., Heng, L.K., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., Fereres, E. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agron. J.* 101:448-459.
- Iqbal, M.A., Shen, Y., Stricevic, R., Pei, H., Sun, H., Amiri, E., Penas, A., del Rio, S. 2014. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agric. Water Manage.* 135, 61–72.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., Ritchie, J.T. 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.* 18, 235–265.
- Kariyama, I.D. 2014. Simulations of the potential yields of Jenguma soybean variety in the upper west region using Aqua Crop model. *International Journal of Scientific & Technology Research* 3(5), 101-106.
- Kooman, P.L., Haverkort, A.J., 1995. Modelling development and growth of the potato crop influenced by temperature and daylength: LINTUL-POTATO. In: Haverkort, A.J., Mac Kerron, D.K.L. (Eds.), *Potato Ecology and Modelling of Crops Under Conditions Limiting Growth*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 41–60.
- Lobell, D.B., Cassman, K.G., Field, C.B., 2009. Crop yield gaps: their importance, magnitude, and causes. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 34, 1–26.
- Lobell, D.B., Ortiz-Monasterio, J.I., Asner, G.P., Naylor, R.L., Falcon, W.P. 2005. Combining field surveys, remote sensing, and regression trees to understand yield variations in an irrigated wheat landscape. *Agron. J.* 97, 241–249.
- Loomis, R.S., Connor, D.J., 1992. *Crop Ecology. Productivity and Management in Agricultural Systems*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Mercau, J.L., Sadras, V.O., Satorre, E.H., Messina, C., Balbi, C., Uribelarrea, M., Hall, A.J. 2001. On-farm assessment of regional and seasonal variation in sunflower yield in Argentina. *Agric. Syst.* 67, 83–103.
- Mkhabela, M.S., Bullock, P.R. 2012. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. *Agric. Water Manage.* 110, 16–24.

- Monteith, J.L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos T R Soc Lond B* 281:277-294.
- Passioura, J.B., Angus, J.F. 2010. Improving productivity of crops in water-limited environments. *Adv. Agron.* 106, 38–74.
- Purcell, L.C., Ball, R.A., Reaper, III, J.D., Vories, E.D. 2002. Radiation use efficiency and biomass production in soybean at different plant population densities. *Crop Sci.* 42:172–177.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to predict yield response to water: II Main algorithms and software description. *Agron. J.* 101, 438-44.
- Rodrigues da Silva, V.D.P., Maciel, G.F., Braga, C.C., Júnior, S., Souza, E.P.D., Almeida, R.S.R., ... & Holanda, R.M.D. 2018. Calibration and validation of the AquaCrop model for the soybean crop grown under different levels of irrigation in the Motopiba region, Brazil. *Ciência Rural*, 48(1):1–8.
- Rollán, A.A., Bachmeier, O.A., 2014. Compactación y retención hídrica en Haplustoles de la provincia de Córdoba (Argentina) bajo siembra directa. *AGRISCIENCIA* 31(1):1–10.
- Sadras, V., Roget, D., O'Leary, G.O. 2002. On-farm assessment of environmental land management constraints to wheat yield and efficiency in the use of rainfall in the Malle. *Aust. J. Agric. Res.* 53, 587–598.
- Sadrás, V.O., Calviño, P.A. 2001. Quantification of grain yield response to soil depth in soybean, maize, sunflower, and wheat. *Agron. J.* 93:577–583.
- Sinclair, T.R., Muchow, R.C., 1999. Radiation use efficiency. *Adv. Agron.* 65:215-265.
- Singh, A.K., Tripathy, R., Chopra, U.K., 2008. Evaluation of CERES-Wheat and CropSyst models for water-nitrogen interactions in wheat crop. *Agric. Water Manage.* 95, 776–786
- Steduto, P., Albrizio R. 2005. Resource-use efficiency of field grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea. II Water use efficiency and comparison with radiation use efficiency. *Agric. For. Meteorol.* 130:269-281.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., Fereres, E. 2009. AquaCrop- the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agron. J.* 101, 426–437.
- Steduto, P., Hsiao T.C., Fereres, E. 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrig. Sci.* 25: 189–207.
- Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003. CropSyst: a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.* 18, 289-307.
- van Ittersum, M.K., Cassman, K.G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., Hochman, Z. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance - A review. *Field Crops Res.* 143, 4–17.
- van Roekel, R.J., Purcell, L.C. 2014. Soybean biomass and nitrogen accumulation rates and radiation use efficiency in a maximum yield environment. *Crop Sci.* 54, 1189–1196.
- Van Wart, J., Kersebaum, Ch., Peng, Sh., Milner, M., Cassman, K.G. 2013. Estimating crop yield potential at regional to national scales. *Field Crops Res.* 143,34–43.
- Wiese, M.V. 1982. Crop management by comprehensive appraisal of yield determining variables. *Annu. Rev. Phytopathol.* 20, 419–432.
- Willmott, C.J., Robeson, S.M., Matsuura, K. 2012. A refined index of model performance. *International Journal of Climatology* 32, 2088-2094.
- Yang, H.S., Dobermann, A., Cassman, K.G., Lindquist, J.L., Walters, D.T., Arkebauer, T.J., Cassman, K.G. 2004. Hybrid-Maize: a maize simulation model that combines two crop modelling approaches. *Field Crops Res.* 87, 131–154.