

Evaluación del modelo de simulación Winlsareg para soja en el litoral oeste del Uruguay

Grasso Joaquín¹, Cadenazzi Mónica², Giménez Luis^{3*}

¹Profesional independiente, Varela 853, 50000 Salto, Uruguay.

²Departamento de Biometría, Estadística y Computación. Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Ruta 3, km 363, 60000 Paysandú, Uruguay.

³Departamento de Producción Vegetal. Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Ruta 3, km 363, 60000 Paysandú, Uruguay. *Correo electrónico: kapoexe@fagro.edu.uy

Recibido: 2016-09-23 Aceptado: 2017-12-19

Resumen

El objetivo del trabajo fue calibrar y validar el modelo Winlsareg para soja en el litoral del Uruguay. El modelo estima las necesidades de agua de los cultivos bajo diferentes condiciones hídricas, mediante la simulación del balance hídrico (BH) de suelos. La información de suelo, cultivo, y clima, utilizada en la evaluación del modelo fue obtenida durante las temporadas 2011 y 2013. La evaluación consistió en ajustar los coeficientes de cultivo (Kc) y los factores de agotamiento de agua disponible sin estrés («p») para las fases de desarrollo (inicial, media y final) de soja, de forma tal de minimizar las diferencias entre los valores observados y simulados del contenido de agua del suelo. El Kc inicial ajustado fue 0,35, el Kc medio 1,18 y el Kc final 0,75. Los «p» ajustados fueron de 0,4 para las fases germinación y R1-R6 y de 0,6 para el resto del ciclo. Los Kc y «p» obtenidos permitieron lograr una elevada concordancia entre los valores simulados y observados del contenido hídrico del suelo para la calibración y la validación con diferentes situaciones de disponibilidad hídrica. El coeficiente de regresión (b) entre valores observados y simulados fue cercano a 1, las estimaciones del error absoluto (AAE) y raíz cuadrada media del error (RCME) fueron menores a 5 %, el coeficiente de Willmott «d» y la eficiencia (EF) cercanos a 1 y el coeficiente de determinación (R²) mayor a 0,8. El resultado de los indicadores estadísticos permite afirmar con certeza el buen funcionamiento del modelo Winlsareg en soja para el litoral del país.

Palabras claves: planificación de riego, *Glycine max*, manejo del agua

Evaluation of the Simulation Model WinISAREG for Soybean on the West Coast of Uruguay

Summary

This study was aimed to calibrate and validate the Winlsareg model for soybeans in the west area of Uruguay. This model estimating the crop water requirements under different moisture conditions by simulating a soil water balance (BH). The soils-climate-crop information was obtained during the 2011 and 2013 seasons. The assessment consisted in searching the cultivation coefficients (Kc) and the no-stress available water depletion factors («p») relative to the initial, mid and end season crop development stages in order to minimize the differences between the observed soil water content values. The best adjusted Kc values were 0.35, 1.18 and 0.75 for initial, mid and end season, respectively. The adjusted «p» value was 0.4 in germination and in R1-R6 phases, while it was 0.6 for the rest of the cycle. The Kc and «p» obtained allowed achieving a high concordance between the simulated and observed values of the water content of the soil for calibration and validation with different situations of water availability. The regression coefficient (b) was very close to 1. The mean absolute error and root mean square error were less than 5 %, the Willmott coefficient and the efficiency (EF) were also close to 1, while the determination coefficient (R²) was higher than 0.8. These results allow to affirm with certainty the proper simulation of Winlsareg model in soybeans in the west area of the country.

Keywords: irrigation planning, *Glycine max*, water management

Introducción

El estrés hídrico es considerado uno de los factores más importantes que limitan el crecimiento y el rendimiento de las plantas en el mundo (Boyer, 1982). En las condiciones de producción del Uruguay las deficiencias hídricas son la principal limitante para la obtención del rendimiento potencial en el cultivo de soja (Agorio et al., 1988; Sawchik y Ceretta, 2005; Giménez y García, 2011; Giménez, 2012). Las deficiencias de agua afectan el rendimiento a través de la disminución en la acumulación de materia seca y por los efectos negativos sobre la tasa de crecimiento del cultivo y la fijación biológica de nitrógeno, que es especialmente vulnerable a la falta de agua (Santos, 2009; Giménez, 2012).

El riego suplementario es una práctica tecnológica que permite aumentar y estabilizar los rendimientos, en la medida que se utilice adecuadamente. Dada la escasa literatura sobre este tema en el país y la creciente importancia del riego en cultivos resulta imprescindible poner a punto herramientas que permitan optimizar los rendimientos y el uso del agua (Agorio et al., 1988; Sawchik y Ceretta, 2005; Giménez y García, 2011; Giménez, 2012).

La programación y el cálculo de las necesidades de riego en base sólo a parámetros del suelo como el contenido de humedad, presenta limitaciones en tanto no se consideran otros factores determinantes de la dinámica del agua que requieren un monitoreo continuo en el tiempo. Por esta razón para desarrollar el cálculo ajustado de las necesidades de riego se utiliza el balance hídrico (BH) de suelos. El BH es un método preciso para calcular las necesidades de riego de un cultivo, integrando aspectos de suelos, cultivo y clima (Pereira et al., 1995, 2010; Allen et al., 2006; Sawchik, 2012).

El modelo de simulación Winlsareg (Teixeira y Pereira, 1992) es una herramienta útil y sencilla que permite estimar el BH de suelos y en base a este calcular las necesidades de agua de los cultivos bajo diferentes tratamientos de riego o secano, así como también programar la gestión del riego para máximos rendimientos o para condiciones de aplicación de agua limitada (Liu et al., 1998; Pereira et al., 2003; Popova, Eneva y Pereira, 2006; Chaterlán et al., 2010; Popova y Pereira, 2011). El BH de suelos en el modelo Winlsareg se desarrolla en base a lo sugerido por Doorenbos y Pruitt (1977) y descrito por Teixeira y Pereira (1992) y Liu et al. (1998). La versión del modelo utilizado por Pereira et al. (2003) adopta la metodología para computar la ETc y las necesidades de riego propuestas por Allen et al. (2006).

Para realizar el BH del suelo se requiere información climática acerca de la precipitación efectiva (Pe) y la evapotranspiración de referencia (ET_o). La ET_o se estima en base a la ecuación Penman-Monteith FAO 56 (Allen et al., 2006) y los cálculos se llevan a cabo con el programa complementario EVAP 56 (Pereira et al., 2003). Asimismo, se requiere información del cultivo, a saber: fechas de ocurrencia de las etapas de desarrollo y los coeficientes de cultivo (Kc) correspondientes a cada etapa (inicial, media y final); máxima profundidad radicular (Zr) y fracción de agua disponible (AD) en el suelo que permite la evapotranspiración sin restricciones denominado factor de agotamiento de agua en el suelo para no estrés «p» (Doorenbos y Pruitt, 1977). Por otra parte, se requiere información sobre el suelo, en el modelo se hace referencia a un suelo de varios horizontes y para cada uno de los mismos se debe ingresar la profundidad respectiva (d), el contenido de agua a capacidad de campo (CC), el punto de marchitez permanente (PMP) y la capacidad total de almacenamiento de agua disponible (CAAD).

Los modelos de simulación previamente a ser utilizados a nivel comercial o experimental deben ser calibrados y validados en las condiciones de suelo-planta-clima donde serán usados (Liu et al., 1998; Pereira et al., 2003; Popova, Eneva y Pereira, 2006; Chaterlán et al., 2010; Ritter, Muñoz-Carpena y Regalado, 2010; Popova y Pereira, 2011).

El modelo Winlsareg ha sido utilizado para diferentes cultivos en varias regiones del mundo; previa evaluación del mismo para las condiciones de aplicación a través de comparar el volumen de agua simulado por el modelo con el observado en el suelo (Liu et al., 1998; Popova, Eneva y Pereira, 2006; Chaterlán et al., 2010; Popova y Pereira, 2011). Sin embargo, la literatura no registra antecedentes en relación a la calibración del modelo en soja. Esto puede ser consecuencia de que la soja en general se cultiva mayoritariamente en condiciones de secano. El objetivo de este trabajo fue calibrar y validar el modelo Winlsareg para soja en el litoral del país de manera de contribuir a mejorar el manejo del agua de riego en el cultivo.

Materiales y métodos

Para evaluar el modelo Winlsareg en soja, se utilizaron los datos provenientes de los experimentos de manejo de agua y riego de soja realizados en la Estación Experimental Dr. M. A. Cassinoni (EEMAC) de la Facultad de Agronomía, ubicada en Paysandú (32° 22' S, 58° 4' W) durante las

temporadas 2011 y 2013. La información climática fue provista a partir de una estación meteorológica automática Vantage Pro 2tm, modelo 6510 (Davis Instruments, Hayward, ca), ubicada aproximadamente a 2000 m del campo experimental de riego de la EEMAC, excepto las precipitaciones que fueron medidas en un pluviómetro en el sitio experimental.

Los datos climáticos utilizados para realizar las simulaciones con Winsareg fueron: ETo (mm d^{-1}) y precipitaciones (mm d^{-1}) diarias. En la Figura 1 se presenta la ETo

mensual para las temporadas 2011 y 2013 y en la Figura 2 se muestran las precipitaciones mensuales para las mismas temporadas y para la serie histórica entre 1961 y 2009.

El suelo del campo experimental de riego de la EEMAC se caracterizó como un Brunosol sub-éutrico típico (Fine, thermic, superactive, mixed, PachicArgiudoll), perteneciente a la formación Fray Bentos y a la unidad San Manuel en la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay escala 1:1000.000 (Altamirano et al., 1976). Las principales características hídricas del suelo se presentan en el Cuadro 1.

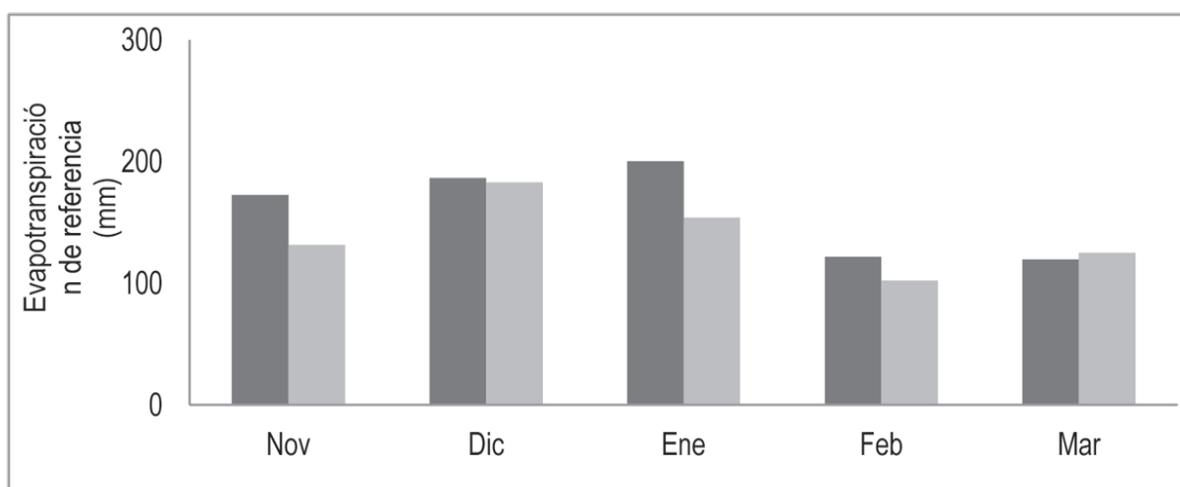


Figura 1. Evapotranspiración de referencia (ETo, mm) mensual entre los meses noviembre y marzo para las temporadas 2011 (barras negras) y 2013 (barras grises)

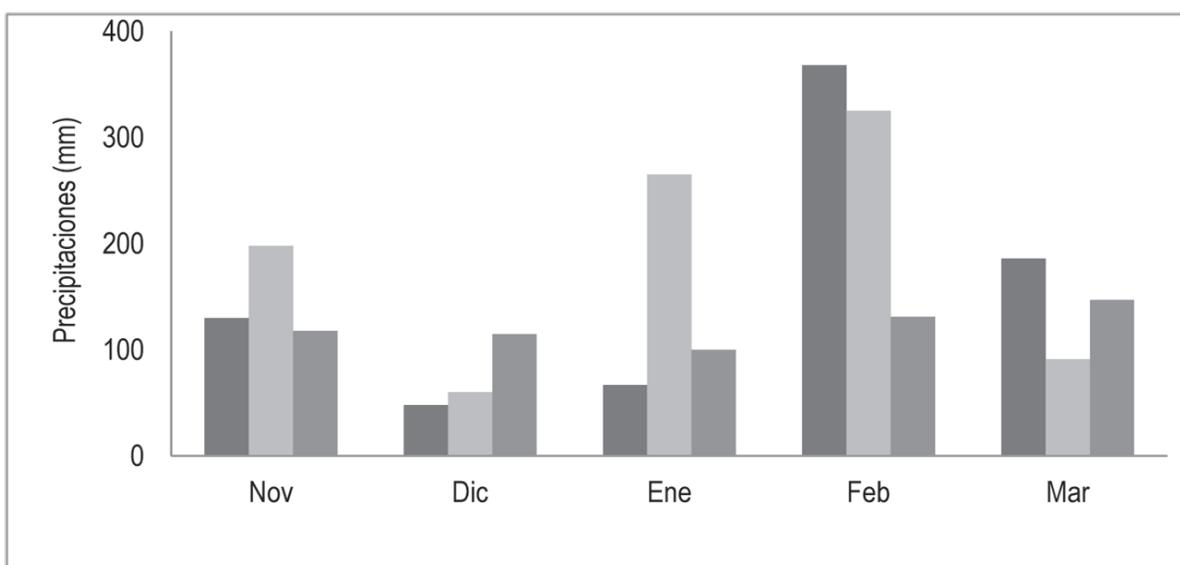


Figura 2. Precipitaciones (mm) promedios mensuales en Paysandú para el periodo noviembre-marzo de la serie histórica 1961 a 2009 (columna gris oscuro), en el campo experimental de riego de la EEMAC en la temporada 2011 (columnas negras) y en la temporada 2013 (columna gris claro)

Cuadro 1. Principales características hídricas del suelo del campo experimental de la Estación Exp. Dr. M.A. Cassinoni.

Horizonte	Profundidad (m)	CC (% volumen)	PMP (% volumen)	CAAD (% volumen)
A	0-0,20	27	14	13
B	0,20-0,60	45	30	15
C	0,60-0,75	32	22	10
Total	0,75			

CC: Capacidad de campo; PMP: Punto de marchitez permanente; CAAD: Capacidad de almacenamiento de agua disponible, expresados como % en volumen de suelo.

La CC y el PMP para cada horizonte del perfil del suelo se utilizaron como datos de entrada en el modelo Windsareg.

El contenido de agua en el suelo fue monitoreado mediante un equipo de sonda de neutrones CPN modelo 503DR HIDROPROBE. Las mediciones de agua se realizaron cada 0,1 m, en tubos de acceso de aluminio de 1 m de longitud y 0,051 m de diámetro. Las fechas en que se realizaron los muestreos fueron: 5/12, 9/12, 15/12, 20/12, 26/12, 2/1, 11/1, 19/1, 10/2, 16/2, 22/2 y 5/3 para la temporada 2011 y 12/12, 26/12, 3/1, 9/1, 18/1, 25/1, 2/2 y 8/2 para la temporada 2013.

Previamente a la utilización del equipo se construyó una curva de calibración para el suelo del campo experimental. Para ello se midió el contenido de humedad a través del método gravimétrico y se realizaron las lecturas a las mismas profundidades con sonda de neutrones, obteniendo una curva de calibración del equipo ajustada con $R^2 = 0,95$ (Giménez, 2010).

Los ensayos se sembraron el 11 y el 21 de noviembre de 2011 y 2013 respectivamente, con una sembradora experimental. Se utilizó una distancia entre surcos de 0,40 m. El cultivar utilizado fue el DM 5.1i, del GM V y con hábito de crecimiento indeterminado. En V2 (Fehr y Caviness, 1997) se realizó un ajuste manual de plantas con el objetivo de lograr una población de 300.000 pl. ha⁻¹.

Los cultivos se mantuvieron libres de plagas, malezas y enfermedades y fueron fertilizados para que no presentaran restricciones nutricionales de manera de que el crecimiento, desarrollo y rendimiento sólo se modificara en respuesta a los cambios en la disponibilidad hídrica.

Los tratamientos (T) evaluados en los ensayos realizados fueron los siguientes:

T1 = Sin deficiencias hídricas en el todo el ciclo, el contenido de agua en el suelo fue igual o superior a 60 % AD

durante el período crítico (PC) e igual o superior a 40 % AD en las etapas no críticas (ENC).

T2 = Deficiencias hídricas desde VE a R4, el contenido de agua del suelo varió entre 20 % y 40 % de AD entre VE y R4 y de 60 a 100 % de AD durante el PC.

T3 = Deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y el PC, el contenido de agua en suelo varió entre 20 y 40 % de AD desde VE a R3 y de 20 a 60 % de AD durante el PC y de 40 a 100 % de AD entre R1 y R2.

T4 = Riego deficitario, el contenido de agua en el suelo varió de acuerdo a las precipitaciones y al riego que implicó la mitad del volumen aplicado en el T1, en cada riego, durante todo el ciclo.

T5 = Secano.

Para la aplicación de la metodología experimental fue considerado el PC de determinación del rendimiento a las etapas comprendidas entre los estadios R4 y R6 (Kantolic, Giménez y de la Fuente, 2003).

El diseño experimental fue de bloques completos aleatorizados con tres repeticiones. Las unidades experimentales fueron 15 y estuvieron constituidas por cinco hileras de cultivo de 5 m de longitud, sembradas con una distancia entre hileras de 0,4 m.

Para obtener los umbrales hídricos de suelo definidos, se realizaron dos tipos de intervenciones en el porcentaje de AD de los tratamientos: riego suplementario utilizado cuando los niveles de agua en suelo fueron inferiores a los porcentajes de AD planificados y la interceptación de las precipitaciones en los tratamientos con déficit hídrico planificado, a través de una protección que impidió la entrada de agua de lluvia (rain out shelters) en cada parcela y que además eran móviles. Las mismas fueron construidas con estructuras de hierro cubiertas con lonas impermeables, las estructuras

fueron diseñadas con techos a dos aguas, dos paredes laterales, una frontal y una trasera. Las dimensiones de las protecciones se adecuaron al tamaño de las parcelas siendo estas de 2 m x 5 m x 1,5 m de altura. Estas fueron colocadas sobre las parcelas de cultivo, en las que se definieron etapas con deficiencias hídricas, antes de cada evento de lluvia y retiradas inmediatamente después de los mismos, de modo de no provocar transformaciones significativas en las condiciones de radiación solar y temperaturas. Para definir la colocación de la protección se utilizaron pronósticos meteorológicos de corto plazo. Estas parcelas estuvieron limitadas externamente por una «ronda» construida en tierra, de modo de impedir la entrada de agua proveniente del escurrimiento. También fueron construidos desagües para evacuar los excesos de agua provenientes del escurrimiento superficial y de los techos de los protectores de agua de lluvias.

El método de riego utilizado fue un sistema de goteo que permitió agregar agua con precisión en el volumen deseado y en la etapa de desarrollo definida. Cada hilera de cultivo dispuso de una cinta de goteros con un caudal nominal de 1,47 l h⁻¹, espaciados cada 0,20 m.

Para determinar la lámina de riego a aplicar se realizó un balance hídrico (BH) de suelos de paso diario, de acuerdo a la siguiente fórmula: $\Delta H_2O = R + PP - ETc$, siendo ΔH_2O la variación del agua en el suelo (mm), R = riego (mm), PP = precipitaciones (mm) y ETc = evapotranspiración de cultivo (mm), estimada según Penman-Monteith, FAO 56, $ETc = ET_0 \times Kc$ (Allen et al., 2006). Durante el desarrollo del cultivo el mismo fue monitoreado determinando la fecha de ocurrencia de cada una de las etapas fenológicas del mismo. Asimismo, se determinó la altura de planta para cada etapa, producción de materia seca y rendimiento total en grano.

Para los objetivos de este trabajo solo se utilizaron los datos del BH del suelo, fenología del cultivo, profundidad radicular y altura de planta (Allen et al., 2006).

Los experimentos descritos anteriormente se realizaron independiente del modelo a evaluar. Esta independencia proporciona condiciones adecuadas para poner a prueba el modelo (Liu et al., 1998).

El proceso de evaluación se realizó siguiendo la metodología descrita por Liu et al. (1998), la cual fue adoptada también por Popova, Eneva y Pereira (2006), Chaterlán et al. (2010) y Popova y Pereira (2011).

La calibración consistió en determinar los valores de los coeficientes de cultivo «Kc» y los factores de agotamiento de agua disponible sin estrés «p», para cada etapa de de-

sarrollo del cultivo (inicial, media y final), que conducen a un mayor ajuste de los valores del contenido de agua del suelo observados y simulados por el modelo. En la calibración se utilizó la base de datos de la temporada 2011 y el tratamiento de bienestar hídrico (T1).

Una vez ajustados los Kc y los «p» en el proceso de calibración se procedió a validar el modelo. Para la validación se desarrollaron las simulaciones con la base de datos de la temporada 2013 para los tratamientos T1, T4 y T5, utilizando los valores de Kc y «p» ajustados en la calibración. El modelo se consideró ajustado cuando los indicadores estadísticos calculados a partir del contenido de agua del suelo simulado por el modelo y el medido (observados), presentaron valores similares a los registrados en la literatura (Liu et al., 1998; Popova, Eneva y Pereira, 2006; Chaterlán et al., 2010; Ritter Ritter, Muñoz-Carpena y Regalado, 2010; Popova y Pereira, 2011).

Las simulaciones del BH del suelo fueron ajustadas con los parámetros de clima (ET₀ y PP), suelos (CC, PMP y profundidad de cada horizonte), cultivos (calendario de eventos fenológicos y profundidad radicular) y riego (fecha y volumen), para cada temporada. El contenido de agua en el suelo fue medido con sonda de neutrones en las fechas antes mencionadas.

Las comparaciones entre el contenido de agua en el suelo simulado por el modelo y el contenido de agua del suelo observado fueron analizadas con los siguientes índices estadísticos de ajuste:

Coefficiente de regresión forzado del original (b),

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n O_i P_i}{\sum_{i=1}^n O_i^2}$$

Coefficiente de determinación (R²),

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2)^{0,5} (\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2)^{0,5}} \right]^2$$

Error absoluto medio (AAE),

$$AAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i - P_i$$

Raíz cuadrada media del error (RCME),

$$RCME = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0,5}$$

Relación de la raíz cuadrada media del error (Rel RCME),

$$Rel\ RCME = \left[\frac{RCME}{\bar{O}} \right] 100$$

Índice de Willmott «d»,

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)}$$

Eficiencia (EF),

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

donde: P_i = valores simulados; O_i = valores observados; n: número de medidas para los pares de datos observados y simulados.

Resultados y discusión

En el Cuadro 2 se presentan los valores de K_c y "p" que mostraron el mejor grado de ajuste para cada etapa de desarrollo del cultivo y la fecha de ocurrencia de las mismas.

Cuadro 2. Coeficientes de cultivo (K_c) y factor de agotamiento de agua disponible en el suelo sin estrés ("p") ajustados en la calibración y ubicación temporal de las etapas de desarrollo del cultivo en la temporada 2011.

	Etapas de crecimiento del cultivo			
	Inicial	De desarrollo	Medio	Final
K_c	0,35	0,35-1,18	1,18	0,75
«p»	0,4-0,6	0,6	0,4	0,6

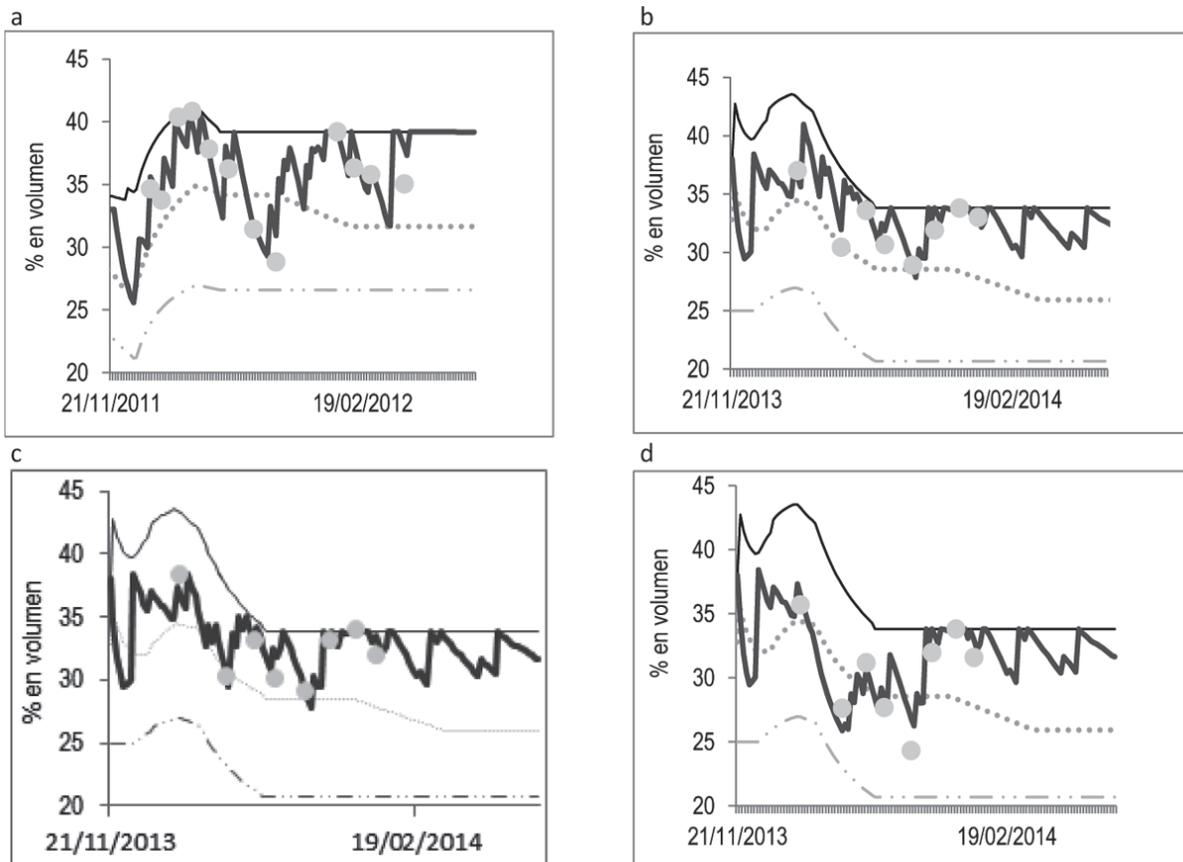


Figura 3. Evolución del contenido de agua en el suelo (% en volumen) simulado (—) y observado (•) a) para la temporada 2011, relativo a la calibración y para la temporada 2013, relativo a la validación para b) T1: bienestar hídrico, c) T4: riego deficitario 50 % de cada riego del T1 y d) T5: secano; (—) capacidad de campo (CC); (···) factor de agotamiento de agua disponible sin estrés («p»); (- . - .) punto de marchitez permanente (PMP)

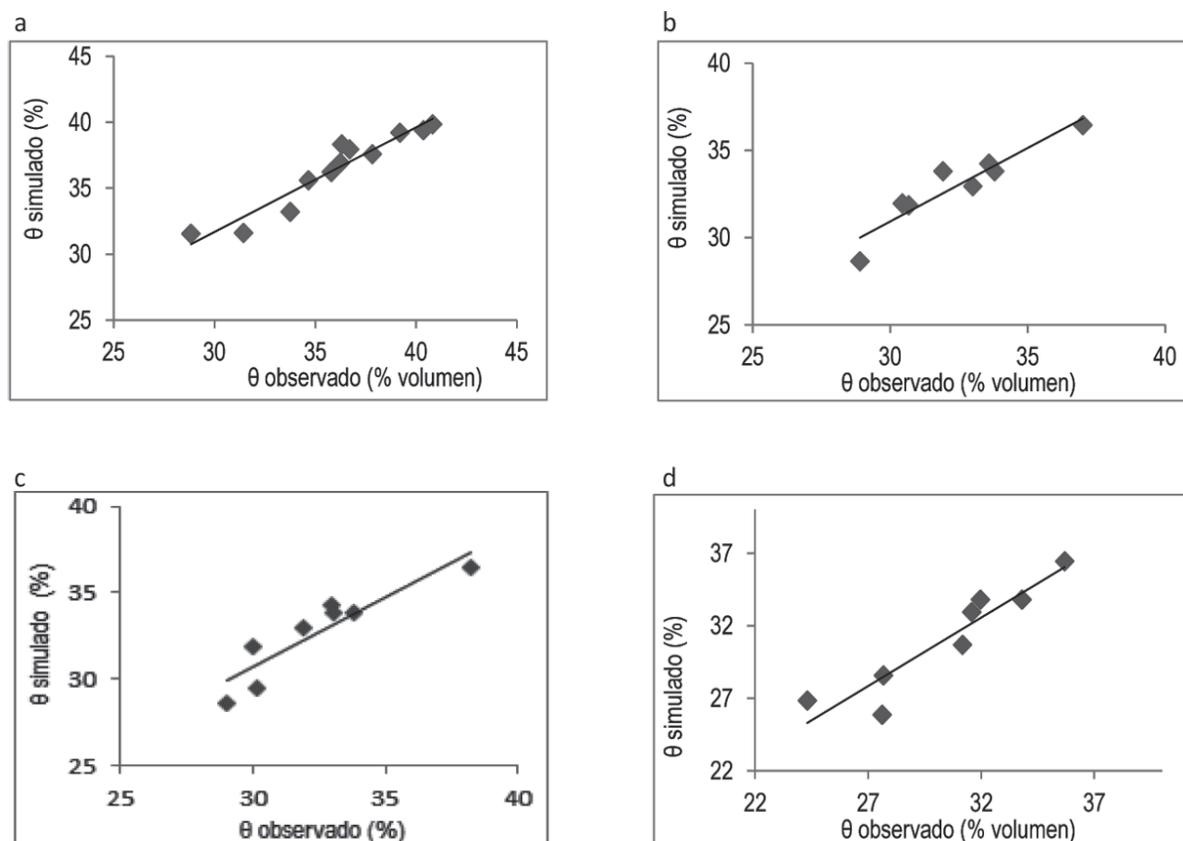


Figura 4. Lineal 1:1 del contenido de agua en el suelo para la calibración del modelo Wlnlsareg, en el tratamiento de bienestar hídrico del experimento de soja en la temporada 2011 (a) y para la validación del modelo, en el tratamiento de bienestar hídrico (b), en el tratamiento de riego deficitario (c) y en el tratamiento en secano (d) del experimento de soja de la temporada 2013

En la Figura 3 se muestra la evolución del contenido de agua en el suelo simulado por el modelo Wlnlsareg al utilizar los Kc y los "p" ajustados en la calibración y el contenido de agua en el suelo observado para la temporada 2011 en el T1 (a) y para la temporada 2013 en T1 (b), T4 (c) y T5 (d).

Los contenidos de agua en el suelo, simulados y observados son similares para los diferentes tratamientos evaluados. Por lo que se puede inferir que para las condiciones de los experimentos al utilizar los parámetros calibrados Kc y "p" para cada etapa de desarrollo, el modelo simuló correctamente el BH de suelos para las diferentes situaciones de riego y secano de soja.

En la Figura 4 se presenta la comparación de los valores de agua en el suelo simulados por el modelo con los valores observados en una línea 1:1, obtenidos en la calibración con el T1 (a) en el año 2011 y en la validación en los diferentes tratamientos de riego evalua-

dos a saber: T1 (b), T4 (c) y T5 (d) en la temporada 2013. Se constató un buen ajuste del contenido de agua en el suelo simulado y observado en la calibración y en la validación en las diferentes situaciones de disponibilidad hídrica estudiadas.

Para evaluar la exactitud de las simulaciones del modelo Wlnlsareg, se calcularon varios índices estadísticos los cuales se presentan en el Cuadro 3. Estos indicaron un buen ajuste entre el contenido de agua en el suelo simulado y observado, el coeficiente de regresión (b) es cercano a 1, mientras que la estimación de los errores fue baja AAE y RCME con valores menores a 5 % y el coeficiente "d" de Wilmott y la EF cercanos a 1. A su vez el R2 obtenido fue elevado superior a 0,8. Esto indica que la mayor parte de la variación de los valores observados fue explicada por el modelo.

Los resultados logrados permiten inferir con un alto grado de confianza que los valores de Kc y "p" ajustados,

Cuadro 3. Coeficientes de determinación (R^2); coeficientes de regresión (b); error absoluto medio (AAE); raíz cuadrada media del error (RCME); relación de la raíz cuadrada media del error (Rel RCME); índice de Willmott (d) y Eficiencia (EF), obtenidos al comparar el contenido de agua en el suelo simulado y observado, en la calibración del modelo WInlsareg para soja, temporada 2011 en T1 (bienestar hídrico) y en la validación del modelo, temporada 2013 para los tratamientos T1 (bienestar hídrico); T4 (riego deficitario); T5 (secano)

	b	R^2	AAE	RCME	RelRCME	Willmott	EF
Calibración T1	1,01	0,87	0,97	1,35	3,75	0,95	0,83
Validación T1	1,02	0,87	0,76	1	3,09	0,95	0,82
Validación T4	1,01	0,83	0,98	1,14	3,53	0,95	0,82
Validación T5	1,02	0,87	1,2	1,43	4,68	0,96	0,83

permiten al modelo WInlsareg simular adecuadamente el BH de suelos para soja bajo las condiciones en las que se desarrollaron los experimentos.

En el Cuadro 3 se observa que los Kc y "p" ajustados difieren de los sugeridos por Allen et al. (2006), sin embargo, estas diferencias están dentro de los rangos posibles manejados por estos autores. El Kc inicial con mayor grado de ajuste fue de 0,35 mientras que Allen et al. (2006) sugieren para esta etapa valores de Kc de 0,5 con un rango recomendado entre 0,1 y 1,15, dependiendo del contenido de humedad en la superficie del suelo. La frecuencia y magnitud de los eventos de humedecimiento del suelo y la ETo son determinantes para el valor del Kc en esta etapa. En la etapa inicial de cultivo, en el T1 del ensayo de la temporada 2011 ocurrieron condiciones de bajo humedecimiento del suelo, tanto en la frecuencia como en la magnitud, y los valores de ETo promedio fueron de 5,7 mm. Esto implicó una situación de disponibilidad hídrica deficitaria para la soja, por lo cual es razonable esperar que el Kc inicial obtenido con mayor ajuste, haya sido un valor relativamente bajo como lo es 0,35.

El Kc medio obtenido con mejor ajuste fue de 1,18 mayor al Kc medio sugerido por Allen et al. (2006) de 1,15, el cual está explicado por la altura de planta en las condiciones de los experimentos en Uruguay, ya que la altura promedio de planta fue ampliamente superior a las utilizadas por Allen et al. (2006), quienes indican alturas de planta de soja entre 0,5 y 1 m. Como se mencionó anteriormente el valor de Kc varía principalmente en función de las características particulares del cultivo, donde solo una pequeña proporción varía en función del clima (Pereira et al., 2003, 2010).

El Kc final que presentó mejor grado de ajuste fue de 0,75; en esta etapa también el Kc obtenido fue superior al sugerido por Allen et al. (2006) de 0,5 para soja. Esta diferencia se explicó por la mayor altura de planta y mejor disponibilidad hídrica (altas y frecuentes PP) durante la etapa final del cultivo. La disponibilidad hídrica abundante en esta etapa provocó que la evaporación desde el suelo sea mayor y a su vez se redujera la tasa de secado del cultivo provocando que las hojas se encuentren activas por más tiempo y por lo tanto evapotranspirando. Allen et al. (2006) indicaron que, dependiendo de los eventos de humedecimiento en esta etapa, el Kc final puede alcanzar valores de hasta 0,9.

En relación al factor "p" se observaron diferencias en los valores ajustados con respecto a los sugeridos por Allen et al. (2006), aunque los mismos también están dentro del rango reportado por estos autores, el cual varía entre 0,3 y 0,7 durante el desarrollo del cultivo.

En las etapas iniciales el factor "p" con mejor ajuste fue de 0,4 a la siembra y de 0,6 a V2. En el período comprendido entre R1-R6 el valor de "p" ajustado fue de 0,4; mientras que en el resto del ciclo en las etapas entre V2 y R1 y en las etapas entre R6 y R8 el valor de "p" que mejor ajustó fue de 0,6.

Los valores de "p" logrados en este trabajo son coincidentes con los reportados por la bibliografía que indica que la disponibilidad de agua en soja tiene mayor importancia en la germinación (Carballo de Silva, 1990) y en las etapas entre R1 y R6. En definitiva, las condiciones de mayor exigencia en disponibilidad hídrica (valores de "p" más bajos) se ubican en el establecimiento del cultivo y en las etapas reproductivas que incluyen al PC de determinación del rendimiento (Andriani, 2002; Mambrin et al., 2005; Giménez, 2012).

El valor de "p" de 0,4 utilizado durante las etapas entre R1 y R6 mostró que a partir de la floración y hasta el final del llenado de grano aumentaron las necesidades hídricas de la soja. Los contenidos de agua en suelo inferiores a 60% de AD incidieron negativamente en la ETC. Por lo tanto, en estas situaciones, se compromete negativamente la producción de materia seca y el rendimiento. Por esos motivos los valores de "p" que mejor ajustaron durante las etapas mencionadas fueron los más bajos.

Conclusiones

La metodología propuesta por Liu et al. (1998), mostró ser eficiente para desarrollar la calibración y la validación del modelo Winsareg para soja en las condiciones agro-climáticas del litoral del Uruguay. Por medio de la comparación del contenido de agua en el suelo simulado por el modelo Winsareg con el observado, se logró calibrar y validar el modelo a través de la determinación de los valores de Kc y de "p" para las etapas inicial, media y final del ciclo de desarrollo de la variedad de soja utilizada del grupo de madurez V.

El modelo Winsareg es una herramienta útil y sencilla que permitió estimar el balance hídrico de suelos y calcular las necesidades de agua de soja bajo diferentes condiciones de riego y de secano.

En consideración a la variabilidad de los grupos de madurez utilizados en el país y a las diferentes características hídricas de los suelos en los que se desarrolla el cultivo, sería recomendable evaluar el modelo con variedades de otros grupos de madurez y en suelos diferentes, esto permitiría ampliar la certeza del funcionamiento de esta herramienta de simulación para el manejo del agua en soja en el país.

Bibliografía

- Agorio, C., Cardellino, G., Corsi, W. y Franco J. (1988). Estimación de las necesidades de riego en Uruguay: I. Magnitud y frecuencia de la lámina neta total. Montevideo: MGAP.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua en los cultivos. FAO. (Estudio FAO: Riego y drenaje, 56).
- Altamirano, A., Da Silva, H., Echeverría, A., Panario, D. y Puentes, R. (1976). Clasificación de suelos del Uruguay (Vol. 1). Montevideo: MAP.
- Andriani, J. M. (2002). Estrés hídrico en soja. IDIA, 21(3), 48-51.
- Boyer, J. (1982). Plant productivity and environment. Science Agronomie, 218, 443-448.
- Carballo de Silva, L. (1990). Manejo del riego en soja sembrada en suelos arenosos de la mesa de guanipa. Agronomía Tropical, 40, 35-56.
- Chaterián, Y., Duarte, C. E., López, T., Paredes, P. y Pereira, L. S. (2010). Determining of crop coefficients for horticultural crops in Cuba through field experiments and water balance simulation. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 19(1), 50-56.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W. O. (1977). Las necesidades de agua de los cultivos. Roma: FAO. (Estudios FAO: Riego y Drenaje, 24).
- Fehr, W. R. y Caviness, C. E. (1977). Stages of soybean development. Iowa: Iowa State University. (Special Report, 80)
- Giménez, L. (2010). Efectos de la disponibilidad hídrica en diferentes etapas de desarrollo de maíz y soja. En: Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas: 1er seminario internacional (pp. 29-37). Montevideo: INIA.
- Giménez, L. (2012). ¿Cuánto estamos perdiendo por no regar cultivos en Uruguay? En Riego en cultivos y pasturas: 2do. seminario internacional (pp. 33-41). Montevideo: INIA.
- Giménez, L. y García, M. (2011). Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. Agrociencia, 15(2), 100-108.
- Kantolic, A. G., Giménez, P. y de la Fuente, E. B. (2003). Periodo crítico para la definición del rendimiento. En E. H. Satorre, R. L. Benech, G. A. Slafer, E. B. de la Fuente, D. J. Miralles, M. E. Otegui y R. Savin. Producción de granos: Bases funcionales para su manejo (pp. 189-192). Montevideo: Facultad de Agronomía.
- Liu, Y., Teixeira, J. L., Zhang, H. J. y Pereira, L. S. (1998). Model validation and crop coefficients for irrigation scheduling in the North China Plain. Agricultural Water Management, 36, 233-246.
- Mambrin, M., Bast, R., Currié, H., Debortoli, D. y Méndez, M. (2005). Evaluación del rendimiento de soja bajo riego en dos modalidades y secano. Corrientes: Universidad Nacional del Nordeste.
- Pereira, L. S., de Juan, J. A., Picornell, M. A. y Tarjuelo, J. M. (2010). El Riego y sus Tecnologías. Recuperado de http://crea.uclm.es/crea/descargas/_files/El_Riego_y_sus_Tecnologias.pdf
- Pereira, L. S., Teodoro, P. R., Rodrigues, P. N. y Teixeira, J. L. (2003). Irrigation scheduling simulation: The model ISAREG. En G. Rossi, A. Cancelliere, L. S. Pereira, T. Oweis, M. Shatanawi y A. Zairi (eds.) Tools for drought mitigation in mediterranean regions (pp. 161-180). Dordrecht: Kluwer.
- Pereira, L. S., van den Broek, B. J., Kabat, P. y Allen, R. G. (1995). Crop-water simulation models in practice. Wageningen: Wageningen Pers.
- Popova, Z., Eneva, S. y Pereira, L. S. (2006). Model validation, crop coefficients and yield response factors for irrigation scheduling based on long-term experiments. Biosystems Engineering, 95(1), 139-149.
- Popova, Z. y Pereira, L. S. (2011). Modelling for maize irrigation scheduling using long term experimental data from Plovdiv region, Bulgaria. Agricultural Water Management, 98, 675 - 683.
- Ritter, A., Muñoz-Carpena, R. y Regalado, C. M. (2010). Capacidad de la predicción de modelos aplicados a la ZNS: Herramienta informática para la adecuada evaluación de la bondad de ajuste con significación estadística. En J. Martínez Fernández y N. Sánchez Martín (eds.). Estudios en la zona no saturada del suelo (Vol. 10, pp. 259-264). Salamanca: Universidad de Salamanca.
- Santos, D. (2009). Tolerancia al déficit hídrico, fijación biológica de nitrógeno y algunos mecanismos que los relacionan en soja. Paraná: INTA.
- Sawchik, J. (2012). Necesidades de riego en cultivos y pasturas. En Riego en cultivos y pasturas: 2do. seminario internacional (pp. 55-68). Montevideo: INIA.
- Sawchik, J. y Ceretta, S. (2005). Consumo de agua por sojas de distintos grupos de madurez en diferentes ambientes de producción. En Jornada Técnica de Cultivos de Verano (pp. 41-45). Montevideo: INIA. (Serie de actividades de difusión, 417).
- Teixeira, J. L. y Pereira, L. S. (1992). ISAREG, an irrigation scheduling simulation model. ICID Bulletin, 41(2), 29-48.