

**SISTEMA DE ASESORAMIENTO AL REGANTE (SAR).
¿CUÁNDO REGAR Y CUÁNTO REGAR? LAS TECNOLOGÍAS
DE INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN (TICs) COMO
HERRAMIENTAS PARA FORTALECER LA CAPACIDAD DE LA
TOMA DE DECISIONES DE LA AGRICULTURA FAMILIAR**

AgTech 19037, Contrato C-RG-T3387-P002

Producto 5. Nota técnica con el informe técnico sobre el estudio de las características del software de balance hídrico.

Gabriel Angella
Juana López
Carolina Frías
Gabriela Barraza



2023



Códigos JEL: Q16

FONTAGRO (Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria) es un programa de cooperación administrado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), pero con su propia membresía, estructura de gobernabilidad y activos. Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, FONTAGRO, de sus Directorios Ejecutivos ni de los países que representan.

El presente documento ha sido preparado por: Gabriel Angella, Juana López, Carolina Frías, Gabriela Barraza (INTA de Argentina).

Copyright © 2023 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial- SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional. Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Esta publicación puede solicitarse a:

FONTAGRO

Correo electrónico: fontagro@fontagro.org

www.fontagro.org





Índice

Resumen	4
Palabras clave	4
Abstract	4
Key words	5
Introducción	5
Desarrollo del Informe Técnico del Producto 5	6
Consideraciones teóricas	6
Características del modelo de cálculo del balance hídrico	8
Datos del lote	9
Datos de cultivo	10
Datos de suelo	15
Datos de lluvia	17
Datos de clima	17
Datos de riego	18
Cálculo del balance hídrico	18
Conclusiones	20
Referencias bibliográficas	21
Instituciones participantes	24



Resumen

La presente Nota Técnica corresponde al Producto 5 del Proyecto, “Nota técnica con el informe técnico sobre el estudio de las características del software de balance hídrico”. El Producto 5 es parte del Componente 2 “Desarrollo de un estudio de un sistema de tecnologías de la información (TICs) del SAR” y se relaciona con la Actividad 2.2 “Calibrar y validar un modelo de cálculo de balance hídrico”. Las relaciones agua-rendimiento son, habitualmente, difíciles de predecir, ya que están determinadas por factores específicos locales. Para evaluar las eficiencias de las prácticas de riego, optimizar su programación (cuándo y cuánto regar) y establecer estrategias de riego deficitario, se debe tener un adecuado conocimiento de las relaciones suelo-agua-planta-atmósfera y, también, de las relaciones entre disponibilidad de agua, producción de biomasa y rendimiento de los cultivos. Una herramienta para evaluar el uso y la productividad del agua en la agricultura se basa en el uso de modelos de simulación, entre los que se puede mencionar: CERES, DSSAT, COTCROP, OZCOT, GOSSYM, APSIM, CropSyst, CROPWAT y AquaCrop. El modelo desarrollado por este proyecto tiene como objetivo principal ayudar a la toma de decisiones en la gestión del agua, básicamente, definir los momentos de riego de los cultivos, de forma tal de que no se produzca disminución de rendimientos como consecuencia de estrés hídrico. Su finalidad es ser una herramienta para mejorar la eficiencia de riego y disminuir la brecha de rendimientos. El modelo realiza un balance de agua del suelo, mediante metodologías de cálculo tradicionales y/o con el apoyo de imágenes satelitales y productos derivados de satélites. Tiene un marco conceptual, componentes o módulos y algoritmos de cálculo. Está destinado a brindar servicio a productores, asesores técnicos y agentes de extensión, buscando un equilibrio entre el requerimiento de datos a ingresar, practicidad y calidad de la información generada. El modelo cuenta con cinco módulos de entrada de datos (lote, cultivo, suelo, clima, riego) y un módulo de cálculos (balance hídrico-programación del riego). El software está en la etapa final de desarrollo. Las ecuaciones, los algoritmos y la interfaz se ajustan en función de las pruebas que se están haciendo en las áreas piloto. Previamente a su publicación, se deberá contar con las autorizaciones y avales de FONTAGRO, para cumplir con los requisitos del Manual de Operaciones y del Manual de Comunicación y Gestión del Conocimiento. En este documento se realiza una descripción general de su aplicación, funcionalidades e interfaces provisorias.

Palabras Clave: balance hídrico, programación del riego, modelos de simulación.

Abstract

This document corresponds to the Product 5 of the Project, "Technical report on the study of the characteristics of the water balance software." Product 5 is part of Component 2 "Development of a study on the SAR's information technology system (ICTs)" and is related to Activity 2.2 "Calibrate and validate a water balance simulation model". Water-yield relationships are usually difficult to predict, as they are determined by specific local factors. To evaluate the irrigation efficiency, optimize the irrigation scheduling (when and how much to irrigate) and establishing



deficit irrigation strategies, it is necessary to have an adequate knowledge of the soil-water-plant-atmosphere relationships and, also, of the relationships between water availability, biomass production and crop yield. A tool for assessing the agricultural water use and productivity are the simulation models, such as CERES, DSSAT, COTCROP, OZCOT, GOSSYM, APSIM, CropSyst, CROPWAT and AquaCrop. The main objective of the model developed by this project is to help decision-making in water management, mainly, defining the irrigation scheduling, in such a way that there is no decrease in yields because of water stress. Its purpose is to be a tool for improving irrigation efficiency and reduce the yield gap. The model performs a soil water balance, using traditional calculation methodologies and/or with the support of satellite images and satellite-derived products. It has a conceptual framework, components or modules and calculation algorithms. It is intended to provide a service to farmers, technical advisors and extension agents, seeking a balance between the input data requirement, simplicity and quality of the output information. The model has five data entry modules (field, crop, soil, climate, irrigation) and a calculation module (water balance-irrigation scheduling). The software is in the final stage of development. The equations, algorithms and interface are adjusted based on the tests that are being done in the pilot areas. Prior to its publication, authorization from FONTAGRO must be obtained, to comply with the requirements of both the Operations' Manual and the Communication and Knowledge Management Manual. This document provides a general description of the model use, functionalities and provisional interfaces.

Key words: water balance, irrigation scheduling, simulation models.

Introducción

El sector agropecuario enfrenta el desafío de incrementar la producción de alimentos para satisfacer la demanda ocasionada por el crecimiento de la población mundial. En este escenario, el riego y la agricultura familiar (AF) tendrán un rol central. La AF es la forma de producción más extendida en el mundo, con más del 90 % del total de explotaciones agropecuarias (500 millones de EAPs) y aporta más del 80 % de los alimentos (FAO 2015). La mayor parte de la AF de América Latina y el Caribe utiliza el riego basado en el conocimiento empírico, lo que ha ocasionado un manejo poco adecuado e ineficiente del agua. El uso de Servicios de Asesoramiento al Regante (SAR), con mayor difusión en estratos de productores medianos y grandes, promueve un manejo sustentable del agua, proporcionando a los agricultores la información necesaria para un manejo más eficiente del riego, lo que aporta a incrementar el rendimiento de los cultivos. Ejemplos de diferentes aproximaciones de diseño de un SAR, su uso y su impacto en el uso del agua, se encuentran, entre muchos otros, en: Lorite *et al* (2012), Vuolo *et al* (2015), Palacios Vélez *et al* (2011), Altobelli *et al* (2018), Tapsuwan *et al* (2015), Unver *et al* (2020).

El creciente acceso a Internet, a la telefonía móvil y a servicios de sensores remotos, son una oportunidad para transferir información y conocimientos a la Agricultura Familiar (AF). El SAR permitirá fortalecer la capacidad de la toma de decisiones de los productores sobre el manejo del



agua a través del uso de programaciones del riego ajustadas a los requerimientos de agua de los cultivos priorizados por la AF.

El objetivo general del proyecto es generar un estudio que permita identificar cómo disminuir la brecha de rendimientos en un grupo de cultivos seleccionados a través del uso de programaciones del riego ajustadas a los requerimientos de agua. Los objetivos específicos son: 1) Elaborar un diagnóstico inicial en las áreas de estudio y desarrollar la infraestructura del Sistema de Asesoramiento al Regante (SAR). 2) Desarrollar un estudio de un sistema de tecnologías de la información (TICs) que constituirán las bases operativas del SAR. 3) Realizar estudios de prueba para implementar el SAR y sentar las bases para su escalamiento.

El organismo ejecutor es la Fundación ArgenINTA y actúan como instituciones co-ejecutoras el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)-Argentina, el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA)-Uruguay y el Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria (INTA)-Nicaragua. Son instituciones asociadas el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)-España, Wageningen University & Research (WUR) de Holanda y la empresa KILIMO de Argentina.

El proyecto está organizado en tres componentes técnicos: C1: “Diagnóstico de la situación inicial y desarrollo de la infraestructura del SAR”, C2: “Desarrollo de un estudio de un sistema de Tecnologías de la Información (TICs) del SAR” y C3: “Estudios de prueba para la implementación, impacto y escalamiento del SAR”.

Esta Nota Técnica describe las características del modelo de balance hídrico, que constituye la base del Servicio de Asesoramiento al Regante.

Desarrollo del Informe Técnico del Producto 5

La presente Nota Técnica corresponde al Producto 5 del Proyecto, “Nota técnica con el informe técnico sobre el estudio de las características del software de balance hídrico”. El Producto 5 es parte del Componente 2 “Desarrollo de un estudio de un sistema de tecnologías de la información (TICs) del SAR” y de la Actividad 2.2 “Calibrar y validar un modelo de cálculo de balance hídrico”.

Consideraciones teóricas

Las relaciones agua-rendimiento son, habitualmente, difíciles de predecir, ya que están determinadas por factores específicos locales. Para evaluar las eficiencias de las prácticas de riego, optimizar su programación (cuándo y cuánto regar) o establecer estrategias de riego deficitario, se debe tener un adecuado conocimiento de las relaciones suelo-agua-planta-atmósfera y, también, de las relaciones entre disponibilidad de agua, producción de biomasa y rendimiento de los cultivos. Un enfoque para evaluar el uso y la productividad del agua en la agricultura se basa en el uso de modelos de simulación. Los modelos son una representación



simplificada de la realidad y su objetivo es simular el funcionamiento de un sistema determinado, a través de un conjunto de ecuaciones. En el caso de los modelos agrícolas, su función principal es estimar la producción de los cultivos en función del clima, el suelo y el manejo tecnológico. Existen numerosos modelos de simulación, entre los que se puede mencionar: CERES (Ritchie et al. 1985); el sistema de soporte de decisiones DSSAT (Jones et al. 2003); COTCROP (Brown et al. 1985), OZCOT (Hearn 1984), GOSSYM (Baker et al. 1983), APSIM (Wang E. et al. 2002) y CropSyst (Stockle et al. 2003). Estos modelos han sido ampliamente usados y, en general, requieren información sobre parámetros de los cultivos (por ejemplo, coeficientes genéticos) que no es sencillo obtener. CROPWAT (Smith et al. 1998) es un modelo simplificado que utiliza funciones empíricas para describir la relación agua-rendimiento. AquaCrop (Steduto et al. 2009) basa la relación entre el crecimiento y rendimiento de los cultivos y la disponibilidad de agua en el comportamiento conservador de la biomasa (B) producida por unidad de agua transpirada por el cultivo (Tr). En las últimas décadas se ha acelerado el conocimiento detallado de los procesos fisiológicos que explican la relación entre el agua y los rendimientos; a su vez, la disponibilidad y precisión de equipos de medición, tanto de campo como de laboratorio, y se ha incrementado notoriamente. La concurrencia de ambos factores ha estimulado el uso los modelos de simulación, con fines productivos, académicos, de investigación, extensión y consultorías.

El modelo desarrollado en este proyecto tiene como objetivo principal ayudar a la toma de decisiones en la gestión del agua, básicamente, definir los momentos de riego de los cultivos, de forma tal de que no se produzca disminución de rendimientos como consecuencia de estrés hídrico. Su finalidad es ser una herramienta para mejorar la eficiencia de riego y disminuir la brecha de rendimientos. El modelo realiza un balance de agua del suelo, mediante metodologías de cálculo tradicionales y/o con el apoyo de imágenes satelitales y productos derivados de satélites. Tiene un marco conceptual, componentes o módulos y algoritmos de cálculo. Está destinado a brindar servicio a productores, asesores técnicos y agentes de extensión, buscando un equilibrio entre el requerimiento de datos a ingresar, practicidad y calidad de la información generada. El modelo cuenta con cinco módulos de entrada de datos (lote, cultivo, suelo, clima, riego) y un módulo de cálculos (balance hídrico-programación del riego).

Un balance de agua en el suelo implica la evaluación de los términos que intervienen en el mismo y cuantifica todos los ingresos y egresos de agua que ocurren en un volumen de suelo dado, durante el período en que se hagan las mediciones. También deben considerarse los cambios en el contenido de humedad de ese volumen de suelo en el mismo período. El balance hídrico del suelo se puede expresar según la Ecuación 1:

$$P + R + Gw - Dr - ET - ES \pm \Delta S = 0 \quad (1)$$

Donde:
P: lluvia
R: riego



Gw: ascensión o ascenso capilar
Dr: drenaje o percolación profunda
ET: evapotranspiración (evaporación más transpiración)
ES: escorrentía o escurrimiento superficial
 ΔS : variación de almacenaje de agua en el suelo

La Figura 1 muestra un esquema de los componentes del balance de agua en el suelo.

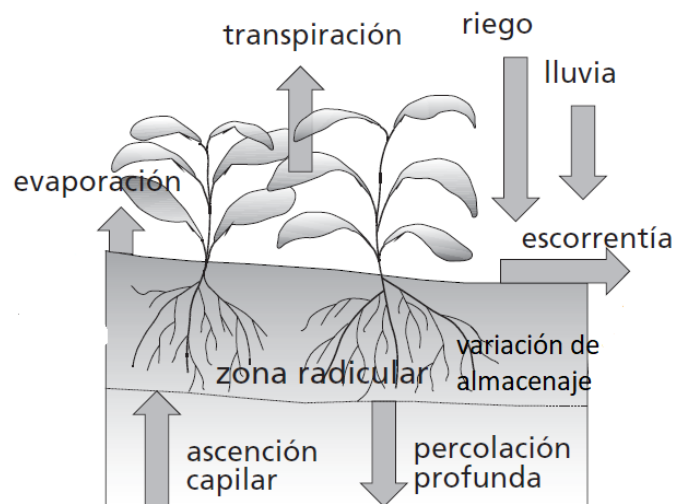


Figura 1. Esquema del balance de agua en la zona radicular (adaptado de Allen et al 2006).

En condiciones de lotes de producción, los valores de P, R, ET, ES y ΔS se pueden obtener o estimar en forma relativamente sencilla, mientras que Gw y Dr son más difíciles de cuantificar.

Características del modelo de cálculo del balance hídrico

Se aclara expresamente que el software está en la etapa final de desarrollo. Las ecuaciones, los algoritmos y la interfaz se ajustan en función de las pruebas que se están haciendo en las áreas piloto. Previamente a su publicación, se deberá contar con las autorizaciones y avales de FONTAGRO, para cumplir con los requisitos del Manual de Operaciones y del Manual de Comunicación y Gestión del Conocimiento.

En este apartado se desarrolla el marco conceptual del modelo y se describen sus módulos y las metodologías de cálculos. Es conveniente aclarar los componentes Gw y Dr (Ecuación 1) no se consideran en los cálculos de este modelo de balance hídrico, ya que ambos componentes son difíciles de cuantificar o estimar en condiciones de campo. La ascensión capilar (Gw) normalmente proviene de una capa freática cercana a la superficie. La magnitud de este aporte de agua depende de la profundidad y dinámica de la capa freática, el tipo de suelo, el clima y la

exploración radicular del cultivo. Por su parte, respecto de la percolación profunda (D_r), se asume que la reposición de agua a través del riego responde a los cálculos del modelo, por lo que D_r sería mínima. Respecto de la lluvia, en esta versión del modelo se usan datos de precipitación total, principalmente debido a que no se dispone de datos con resolución adecuada para aplicar métodos de cálculo de la precipitación efectiva (por ejemplo, el método de la curva número).

El modelo se desarrolló como una herramienta práctica y de uso sencillo para establecer calendarios de riego, esto es, decidir cuándo y cuánto regar. Está destinado a brindar un servicio a productores, asesores técnicos y agentes de los servicios de extensión, buscando un equilibrio entre el requerimiento de datos a ingresar, practicidad y calidad de la información brindada. Los momentos y dosis de riego se definen en base a un balance diario de las relaciones agua-suelo-cultivo-atmósfera. La interfaz del software está en desarrollo y las pantallas principales se presentan a lo largo de este informe. La Figura 2 muestra la pantalla inicial.



Figura 2. Pantalla inicial del software de balance hídrico (interfaz provisoria, sujeta a modificaciones según normativas de FONTAGRO).

El modelo cuenta con cinco módulos de entrada de datos (lote, cultivo, suelo, clima, riego) y un módulo de cálculos (balance hídrico-programación del riego). A continuación, se describen cada uno de los módulos, la información que se ingresa, las unidades y los procedimientos de cálculos.

Datos del lote

En este módulo se ingresan los siguientes datos:

Identificación del campo

Identificación del lote

Cultivo



Fecha de siembra
Método de riego
Tipo de explotación

Identificador del campo

Es el nombre ingresado por el usuario para identificar el campo en el cual se encuentra el lote, Por ejemplo 'La María'

Identificación del lote

Es el nombre ingresado por el usuario para identificar el lote, Por ejemplo 'Lote 2A'

Cultivo

Inicialmente se podrá seleccionar un cultivo de un conjunto de cultivos que se monitorean en el marco del proyecto. Una vez escalado el proyecto, se podrán dar de alta otros cultivos.

Fecha de siembra

Se ingresa en formato dd/mm/aaaa en el cuadro correspondiente.

Método de riego

Se debe seleccionar el método de riego desde un conjunto de opciones: manto, surco, aspersión, goteo.

Tipo de explotación

Se debe seleccionar el método de riego desde un conjunto de opciones: agrícola, agrícola-ganadera, lechera, cítrica y frutícola, hortícola.

Datos de cultivo

En este módulo se ingresan los siguientes datos:

Nombre del cultivo

Fecha de siembra o transplante

Profundidad del crecimiento de raíces

Duración de las etapas de crecimiento

Coefficiente de cultivo (K_c) inicial, máximo y final

Fracción de agotamiento crítico o permisible (p)

Fecha de cosecha

Nombre del cultivo

Es la identificación del cultivo, que permite especificar alguna particularidad del cultivo. Por ejemplo: "algodón tardío" o "alfalfa de primavera-verano".

Fecha de siembra o transplante

Es la fecha de siembra o transplante del cultivo en el lote donde se hace el seguimiento. Se ingresa en formato dd/mm/aaaa en el cuadro correspondiente.



Profundidad del crecimiento de raíces

La profundidad inicial de las raíces se considera 0,20 metros (m) por defecto y la máxima profundidad se alcanza cuando se inicia la etapa de mediados de temporada (ver debajo en el apartado de las etapas de crecimiento y la Figura 6). Entre la profundidad inicial de raíces y la máxima, el modelo estima la tasa de crecimiento mediante una interpolación lineal de paso diario. A esas profundidades el modelo calcula el balance hídrico. La profundidad se ingresa en metros (m) en el cuadro correspondiente.

Duración de las etapas de crecimiento

Las etapas de crecimiento del cultivo son las siguientes:

Etapa inicial: se extiende desde la fecha de siembra o plantación hasta que el cultivo cubre aproximadamente el 10% del suelo.

Etapa de desarrollo del cultivo: se extiende desde el momento en que el cultivo cubre el 10% del suelo hasta la plena cobertura. La cobertura completa para muchos cultivos se produce al inicio de la floración.

Etapa de mediados de temporada: se extiende desde la cobertura plena hasta el inicio de la madurez. El inicio de la madurez es a menudo percibido por el comienzo de la madurez del cultivo, color amarillento o la senescencia de hojas, caída de hojas, o madurez de los frutos de manera que la evapotranspiración del cultivo se reduce respecto de la evapotranspiración de referencia.

Etapa final: se extiende desde el inicio de la madurez hasta la cosecha o la plena senescencia. Se presume que el cálculo de K_c y ET_c concluye cuando el cultivo es cosechado, se seca naturalmente, llega a la plena senescencia o pierde sus hojas (Smith et al 1998).

La duración de cada etapa, expresada en días, se ingresa para cada cultivo en el cuadro correspondiente.

Coefficiente de cultivo (K_c) inicial, máximo y final

El coeficiente de cultivo (K_c) integra el efecto de las características que distinguen a un determinado cultivo de aquellas del cultivo de referencia (el cultivo de referencia es un cultivo de cobertura similar a un césped). Según el enfoque de coeficiente de cultivo, la evapotranspiración de cultivo en condiciones estándar (ET_c) se calcula multiplicando la evapotranspiración de referencia (ET_o) por el K_c adecuado para ese cultivo (Allen et al 2006). El K_c está influenciado principalmente por el tipo de cultivo y, en menor proporción, por el clima. El K_c para un determinado cultivo varía según sus etapas de crecimiento, dado que la cubierta del suelo, la altura del cultivo y el área foliar cambian a medida que el cultivo se desarrolla.



Kc inicial: durante este período, el área foliar es pequeña y la evapotranspiración se debe principalmente a la evaporación del suelo. Por ello, el valor de Kc durante este período es mayor cuando el suelo está húmedo, ya sea por aportes de riego o de lluvia y es bajo cuando la superficie del suelo está seca.

Kc de desarrollo: a medida de que el cultivo se desarrolla y cubre el suelo, la evaporación se hace menor y la transpiración gradualmente se incrementa, siendo el proceso principal de uso de agua durante esta etapa.

Kc de mediados de temporada: en esta etapa el Kc alcanza su valor máximo.

Kc de fin de temporada: el valor de Kc al final del periodo de cultivo (cosecha) depende de las prácticas de manejo de agua y del cultivo. Es alto si el cultivo es mantenido con riego frecuente y cosechado en fresco (por ejemplo, hortalizas de hoja). Si el cultivo continúa su ciclo hasta la senescencia y el producto cosechado tiene poca humedad (granos, oleaginosas, algodón), el valor de Kc será pequeño (Allen et al 2006). En la Figura 3 se ilustra la variación de Kc para diferentes cultivos influenciada por factores climáticos y de desarrollo de los cultivos.

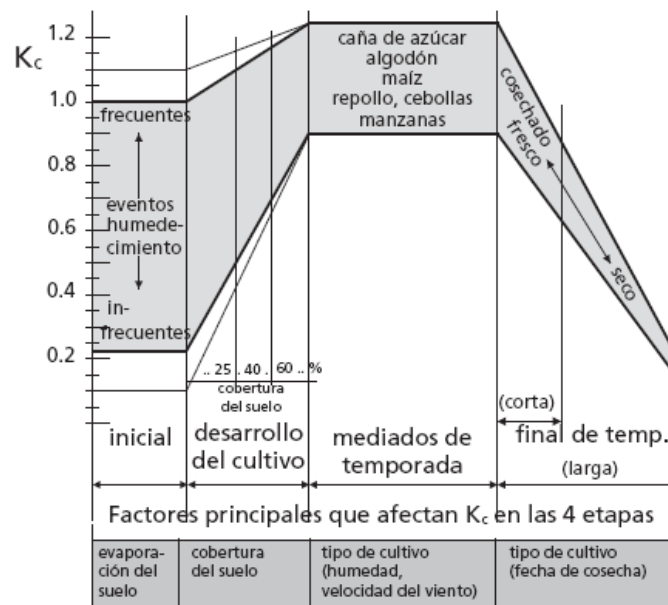


Figura 3. Variación del K_c para diferentes cultivos, según factores climáticos y etapa de desarrollo de los cultivos (Allen et al 2006).

Se ingresan tres valores de K_c : inicial, de mediados de temporada y fin de temporada. Estos datos pueden obtenerse de experimentos locales, realizados por institutos o universidades, o de tablas de la publicación Estudio FAO Riego y Drenaje 56 (Allen et al 2006). Los valores de K_c entre el valor inicial y el de mediados de temporada, y entre este último y el de fin de temporada se calculan por interpolación.

El modelo tiene la opción de estimar valores de K_c usando imágenes satelitales. Los coeficientes



de cultivo (la relación entre la evapotranspiración real y la de referencia, ET/ET_0) pueden derivarse de los índices de vegetación (VI) obtenidos mediante teledetección. Si se dispone de estaciones meteorológicas para calcular ET_0 , se puede aplicar el método de FAO-Penamn Monteith para estimar la ET real de los cultivos, en combinación con series de imágenes de satélite (Mateos et al 2013). Los coeficientes de los cultivos pueden relacionarse con los VI, transformaciones de reflectancias superficiales medidas en bandas específicas del espectro electromagnético, normalmente el rojo e infrarrojo cercano, obtenidas por teledetección (Bausch y Neale 1987; Neale et al 1989). Este enfoque se denomina método VI- ET_0 . La abundante literatura desde Heilman et al (1982) Neale et al (1987), pone de manifiesto la buena relación lineal existente entre el coeficiente de cultivo basal de una cubierta, análogo a un coeficiente de transpiración, y los índices de vegetación, como el Índice de Vegetación por Diferencias Normalizado, NDVI, así como con otros índices como el SAVI (Calera et al 2016).

El NDVI es un parámetro que se obtiene de forma robusta, simple y directa desde las imágenes multispectrales mediante una combinación algebraica de las reflectividades en el rojo e infrarrojo cercano. Mide el tamaño fotosintético relativo de la cubierta, y recoge cómo la cubierta vegetal absorbe la radiación solar fotosintéticamente activa. La Ecuación (2) que se propone para la relación entre el coeficiente de cultivo K_c y el NDVI ha sido ampliamente validada en cultivos herbáceos como trigo, cebada, maíz, algodón, girasol, que en su fase de máximo desarrollo alcanzan una cobertura del suelo casi completa (Allen 2011).

$$K_c = 1.25 \text{ NDVI} + 0.1 \quad (2)$$

La ecuación (2) permite obtener valores de K_c desde una imagen en la que se ha calculado el valor del NDVI para cada pixel y asignarlos a los distintos puntos de una parcela. Además, puede obtenerse la evolución temporal del coeficiente K_c si se cuenta con una serie temporal de imágenes. La secuencia de imágenes permite, entonces, describir la evolución de la cubierta concreta, atendiendo a sus características específicas de siembra y crecimiento y muestra la variabilidad espacial y temporal que los distintos factores de suelo y manejo pueden introducir (Calera et al 2016). Otra estimación del K_c desde el NDVI es $K_c = 0,85 \text{ NDVI} + 0,47$, más apropiada para cultivos como la cebolla, en el que la fracción de suelo descubierto, y por tanto la componente evaporativa de la ET, es mayor que para cultivos que tienen mayor desarrollo foliar. El método VI- ET_0 es válido y robusto para estimar la evapotranspiración distribuida espacialmente en grandes zonas de regadío (Mateos et al 2013). En caso de que el K_c se estime en función del NDVI, no será obligatorio ingresar manualmente valores de K_c .

Fracción de agotamiento crítico (p)

El Factor de agotamiento crítico, factor de agotamiento permisible (p), o umbral de riego (UR) es el contenido de humedad en el suelo a partir del cual ocurre estrés debido a que la disponibilidad de agua no es adecuada. Esto afecta a la tasa de evapotranspiración del cultivo y, si las



condiciones de estrés se prolongan en el tiempo, a su rendimiento. El valor de “p” se expresa como una fracción del Agua Disponible Total (ADT). El ADT o Agua Útil es cantidad total de agua que está disponible para el cultivo y se define como la diferencia en el contenido de humedad del suelo entre la Capacidad de Campo (CC), también llamado Límite Superior y el Punto de Marchitez Permanente (PMP), también llamado Límite Inferior. El agua contenida por encima de la CC no está disponible para las plantas, dado que no puede ser retenida en el suelo en contra de la fuerza de la gravedad y drena en profundidad. Por su parte, el agua que se encuentra por debajo del PMP no puede ser extraída por las raíces, ya que está retenida en el suelo a altos potenciales. El ADT depende de la textura, estructura y contenido de materia orgánica del suelo y se expresa en mm por metro de profundidad de suelo. La cantidad de agua que se encuentra entre CC y el UR se conoce como Agua Fácilmente Aprovechable o Disponible (AFA). En la Figura 4 se presenta un esquema que sintetiza estos conceptos.

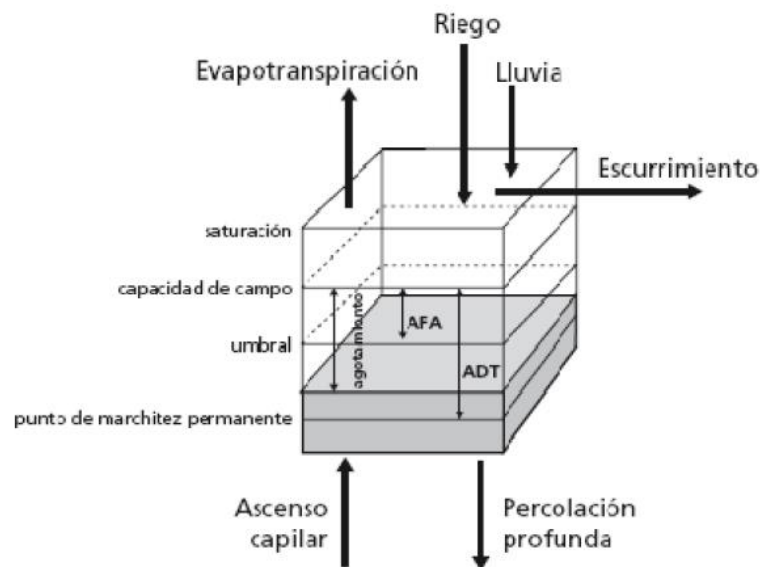


Figura 4. Componentes del balance hídrico del suelo incluyendo conceptos básicos asociados a la programación del riego (Allen et al 2006).

En general, el valor de “p” varía entre 0.4 y 0.6, tomando los valores más bajos (más cercanos a 0) para cultivos sensibles a la falta de agua, con sistemas radiculares superficiales y bajo condiciones de alta ET, mientras que los valores más altos (más cercanos a 1) corresponden a cultivos extensivos, con raíces profundas y en condiciones de baja ET. La influencia de la ET sobre el factor de agotamiento permisible “p” se presenta en la Figura 5.

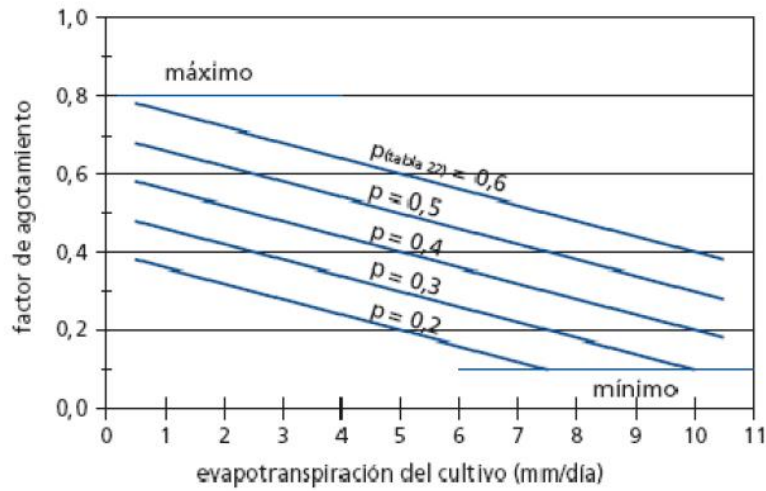


Figura 5. Variación del factor de agotamiento permisible (p) en función de la tasa de ETc (Allen et al 2006).

El valor de “p”, que varía entre 0 y 1, se ingresa para cada cultivo en el cuadro correspondiente.

En la Figura 6 se muestra la pantalla para ingresar los datos de cultivo.

Detailed description of Figure 6: The screenshot shows a software interface titled 'ARCHIVO DE CULTIVO'. It contains several input fields: 'Cultivo', 'Fecha de siembra (dd/mm/aa)', and 'Factor "p"'. Below these, there are fields for 'Kc' and 'Prof. de raíces (m)'. A section for 'Duración etapas (d)' includes five sub-fields: 'Inicial', 'Desarrollo', 'Media', 'Final', and 'Ciclo total'. Blue lines connect the 'Cultivo' and 'Fecha de siembra' fields to the 'Kc' field, and the 'Prof. de raíces (m)' field to the 'Ciclo total' field.

Figura 6. Pantalla para ingresar datos de cultivo (interfaz provisoria, sujeta a modificaciones según normativas de FONTAGRO).

Datos de suelo

En este módulo se ingresan los siguientes datos, para cada espesor de suelo (ejemplo: 0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 cm). La profundidad total de muestreo se define para cada cultivo y depende de la capacidad de exploración radicular.

- Textura
- Agua disponible total o agua útil (mm)

Para la profundidad total de raíces asignada a cada cultivo, se ingresa:

- Agua útil inicial (al momento de la siembra o plantación), en mm.

El Agua fácilmente aprovechable (mm), se calcula a partir del ADT del suelo para toda la profundidad de exploración radicular del cultivo, y el factor “p”. Para ingresar los datos de agua disponible total o agua útil, el usuario podrá elegir diferentes opciones de carga, de acuerdo con los datos disponibles (Figura 7).

Opción 1

Prof (cm)	DAP	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Clase Textural
0-20	1.32	10	50	40	Franco limosa
20-40	1.52	7	45	48	Franco
40-60	1.39	5	42	53	Franco arenosa
60-80	1.44	10	40	50	Franco
80-100	1.46	8	37	55	Franco arenoso

Opción 2

Prof (cm)	PMP	CC
0-20		
20-40		
40-60		

Opción 3

Profundidad (cm)	Textura
0-20	
20-40	
40-60	
60-80	
80-100	
100-125	
125-150	

Figura 7. Opciones de ingreso de datos de suelo (interfaz provisoria, sujeta a modificaciones según normativas de FONTAGRO).

La opción 1 permite cargar datos de densidad aparente y contenido de arcilla, limo y arena (en porcentaje) para cada una de las profundidades. Utilizando estos datos se calculan, mediante una función de pedotransferencia, las constantes hídricas del suelo (capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente) por profundidad, para derivar el ADT para cada profundidad y, posteriormente, el ADT para la profundidad total de las raíces. En la opción 2 se ingresan las



constantes hídricas del suelo por profundidad, para derivar el ADT de cada profundidad y, posteriormente, el ADT o AU para la profundidad total de las raíces. En la opción 3 (no se dispone de los datos de las opciones 1 y 2) se carga la clase textural de cada profundidad, para derivar el ADT de cada profundidad y posteriormente el ADT o AU hasta la profundidad de las raíces, usando una tabla orientativa (disponible en el modelo), que relaciona la clase textural y el ADT.

Datos de lluvia

En este módulo se ingresan datos diarios de lluvia, en mm. El modelo tiene la opción de acceder a los datos de lluvia directamente de estaciones meteorológicas automáticas, de forma remota y en tiempo real.

Datos de clima

En este módulo se calcula la evapotranspiración de referencia (ET_o) mediante la metodología FAO Penman-Monteith (FAO-PM, Allen et al 2006) a partir de datos meteorológicos de estaciones automáticas, que se acceden de manera remota en tiempo real, usando la ecuación de la Figura 8. Además, el modelo tiene la opción de ingresar directamente valores de ET_o medidos, estimados por FAO-PM, o por otros métodos.

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 u_2)}$$

donde:

ET _o	evapotranspiración de referencia (mm día ⁻¹)
R _n	radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m ⁻² día ⁻¹)
R _a	radiación extraterrestre (mm día ⁻¹)
G	flujo del calor de suelo (MJ m ⁻² día ⁻¹)
T	temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
u ₂	velocidad del viento a 2 m de altura (m s ⁻¹)
e _s	presión de vapor de saturación (kPa)
e _a	presión real de vapor (kPa)
e _s - e _a	déficit de presión de vapor (kPa)
Δ	pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C ⁻¹)
γ	constante psicrométrica (kPa °C ⁻¹)

Figura 8. Estimación de ET_o por la ecuación de FAO Penman-Monteith (Allen et al 2006)

En caso de que se dispongan datos de ET_o ya calculados, los datos se ingresan en la planilla correspondiente (Figura 9). La unidad de la ET_o es mm.



Nombre de la estación		Año		Latitud		Longitud		Altitud				
Mes												
Día	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												
23												
24												
25												
26												
27												
28												
29												
30												
31												

Figura 9. Pantalla para ingresar datos de ET medidos (interfaz provisoria, sujeta a modificaciones según normativas de FONTAGRO).

Datos de riego

En este módulo ingresan los riegos aplicados durante el ciclo del cultivo.

Cálculo del balance hídrico

El balance hídrico del suelo (Ecuación 1) tiene por objeto evaluar el estado de la humedad del suelo, considerando todos los ingresos y egresos de agua en la zona radicular, durante un determinado período. En este modelo el balance hídrico durante el ciclo del cultivo se calcula diariamente, usando la información de los módulos de clima, suelo, cultivo y riegos, para estimar el agua disponible sobre el umbral de riego. Cuando este valor se acerca a 0, se dispara la alarma de riego, para que el contenido de humedad no caiga por debajo del umbral. La dosis de riego a aplicar son los mm necesarios para llevar el contenido hídrico del suelo desde el umbral hasta capacidad de campo (lámina neta). Específicamente, el procedimiento de balance diario se hace con la Ecuación 3.

$$\Theta_{ur}(i) = AU (i-1) + P(i) - ETc_{aj}(i) - ES(i) \quad (3)$$



Donde

Θ ur (i) contenido de humedad sobre el umbral de riego en la zona radicular al final del día i [mm],

AU (i-1) agua útil en la zona radicular al final del día anterior

P(i) precipitación en el día i [mm],

ETc (i) evapotranspiración del cultivo en el día i [mm],

ES (i) escurrimiento superficial en el día i [mm],

También es posible ingresar datos de humedad de suelo medidos *in situ*, para verificar los cálculos del modelo y corregir, de ser necesario, el contenido de agua sobre el umbral de riego. Cuando se ingresa un valor de humedad medido (expresado en mm), el balance se retoma a partir de este dato y no a partir de AU (i-1). La Figura 10 presenta la pantalla de cálculo del balance hídrico y programación del riego.

Balance hídrico-Programación del riego											
Cultivo: Algodón		Fecha de siembra: 1/11/1988				Lote: A					
Fecha	DDS	ETo (mm/día)	KC	ETC (mm/día)	ETc acumulada (mm)	Lluvia (mm)	Agua útil disponible (mm)	Porcentaje AU disponible	Humedad del suelo medida (mm)	Agua sobre el umbral de riego (mm)	Riego (mm)
28-nov-88	27	5,7	0,54	3,07	81,71	0,0	103,9	58%		13,8	
29-nov-88	28	5,8	0,56	3,25	84,97	0,0	100,6	56%		10,5	
30-nov-88	29	4,9	0,59	2,85	87,82	2,5	100,3	56%		10,2	
1-dic-88	30	6,1	0,61	3,71	91,52	0,0	96,5	54%		6,5	
2-dic-88	31	6,5	0,63	4,12	95,65	0,0	92,4	51%		2,4	
3-dic-88	32	7,9	0,66	5,17	100,81	0,0	87,3	48%		-2,8	
4-dic-88	33	9,6	0,68	6,53	107,34	0,0	170,7	95%		80,7	90,0
5-dic-88	34	5,0	0,70	3,54	110,89	0,0	167,2	93%		77,1	
6-dic-88	35	6,0	0,73	4,38	115,26	0,0	162,8	90%		72,7	
7-dic-88	36	4,6	0,75	3,46	118,72	8,5	167,9	93%		77,8	

Figura 10. Pantalla de balance hídrico y programación del riego (interfaz provisoria, sujeta a modificaciones según normativas de FONTAGRO).

Donde:

DDS: días desde la siembra o plantación

ETo: evapotranspiración de referencia

Kc: coeficiente de cultivo

ETc: evapotranspiración del cultivo

Lluvia: precipitación total

Agua útil disponible: contenido de agua útil disponible en el suelo, para la profundidad radicular considerada

Porcentaje AU disponible: contenido de agua útil disponible, expresado como porcentaje del AU o ADT.

Humedad de suelo medida: contenido de humedad del suelo determinado por gravimetría. Se puede ingresar regularmente durante el ciclo del cultivo para verificar los cálculos del balance

Agua sobre el umbral de riego: humedad del suelo por encima del umbral de riego



Conclusiones

El modelo simplificado de balance hídrico del suelo desarrollado en este proyecto tiene como objetivo principal ayudar a la toma de decisiones en la gestión del agua a nivel predial; básicamente, definir los momentos de riego de los cultivos, de forma tal de que no se produzca disminución de rendimientos como consecuencia de estrés hídrico. El modelo es el corazón operativo del SAR y da respuesta a las dos preguntas básicas de la programación del riego: cuándo y cuánto regar. Su finalidad es ser una herramienta para mejorar la eficiencia de riego y disminuir la brecha de rendimientos. Está destinado a brindar un servicio a productores, asesores técnicos y agentes de los sistemas de extensión de instituciones públicas. El modelo realiza un balance de agua del suelo, mediante metodologías de cálculo tradicionales y/o con el apoyo de imágenes satelitales y productos derivados de satélites. Tiene un marco conceptual, componentes o módulos y algoritmos de cálculo y busca un equilibrio entre el requerimiento de datos a ingresar, practicidad y calidad de la información generada. Cuenta con cinco módulos de entrada de datos (lote, cultivo, suelo, clima, riego) y un módulo de cálculos (balance hídrico-programación del riego). Se aclara expresamente que el software está en la etapa final de desarrollo. Las ecuaciones, los algoritmos y la interfaz se ajustan en función de las pruebas que se están haciendo en las áreas piloto. Previamente a su publicación, se deberá contar con las autorizaciones y avales de FONTAGRO, para cumplir con los requisitos del Manual de Operaciones y del Manual de Comunicación y Gestión del Conocimiento.



Referencias bibliográficas

Allen, R.G.; L. S. Pereira; D. Raes; M. Smith. 2006. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy, 300 pg.

Allen, R.G. 2011. Skin layer evaporation to account for small precipitation events—An enhancement to the FAO-56 evaporation model. *Agricultural Water Management*, 99(1): 8-18.

Altobelli, F., Lall, U., Dalla Marta, A., Caracciolo, F., Cicia, G., D'Urso, G., & Del Giudice, T. 2018. Willingness of farmers to pay for satellite-based irrigation advisory services: a southern Italy experience. *The Journal of Agricultural Science*, 156(5), 723-730. Doi:10.1017/S0021859618000588.

Baker, D.N.; J.N. Larnbert and J.M. McKinion. 1983. GOSSYM: A simulator of cotton growth and yield. Tech. Bull. 1089. South Carolina Agric. Exp. Stn., Clemson.

Bausch, W., C. Neale. 1987. Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept. *Transactions of the ASAE* 30, 703–709.

Brown, L.G.; J.W. Jones; J.D. Hesketh; J.D. Hartsog; F.D. Whisler and F.S. Harris. 1985. COTCROP: Computer simulation of growth and yield. Information Bull. No. 69. Agric. Forest. Exp. Stn., Mississippi State, MS.

Calera A., I. Campos y J. Garrido-Rubio. 2016. Determinación de las necesidades de agua y de riego mediante estaciones meteorológicas y series temporales de imágenes multiespectrales. Jornada técnica de innovación en gestión del regadío mediante redes agroclimáticas, teledetección y sistemas de información. CENTER. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/images/es/caleraaccesoasecuenciastemporales2_tcm30-131718.pdf, consultado abril de 2023.

FAO. 2015. El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. ISBN 978-92-5-308536-1 (edición impresa) E-ISBN 978-92-5-308537-8 (PDF). Roma, 2015.

Hearn, A.B.; G.A. Constable. 1984. Irrigation for crops in a sub-humid environment. VII Evaluation of irrigation strategies for cotton. *Irrig. Sci.* 5:75–94.

Heilman, J., W. Heilman y D. Moore. 1982. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. *Agronomy Journal*, 74: 967-971.

Jones, J.; G. Hoogenboom; C.H. Porter; K.J. Boote; W.D. Batchelor; L.A. Hunt; P.W. Wilkens; U.



Singh; A.J. Gijsman; J.T. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model. *Europ. J. Agronomy* 18 (2003) 235/265.

Lorite, I.J., García-Vila, M., Carmona, MA. *et al.* Assessment of the Irrigation Advisory Services' Recommendations and Farmers' Irrigation Management: A Case Study in Southern Spain. *Water Resour Manage* 26, 2397–2419 (2012). <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0023-3>

Mateos L., M. González-Dugo, L. Testi, F. Villalobos. 2013. Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. I. Method validation, *Agricultural Water Management*, Volume 125, 2013, Pages 81-91, ISSN 0378-3774, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.005>.

Neale, C. 1987. Development of Reflectance-based crop coefficients for corn. Ph. Dissertation. Colorado State University. Fort Collins.

Neale, C., W. Bausch, D. Heermann. 1989. Development of reflectance based crop coefficients for corn. *Transactions of the ASAE* 32, 1891–1899.

Palacios-Vélez, E.; Julio Enrique Palacios-Sánchez, Luis Alberto Palacios-Sánchez. 2011. Agricultura de riego asistida con satélites. *Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería Hidráulica en México*, vol. II, núm. 2, abril-junio de 2011, pp. 69-81.

Ritchie, J.T., D.C. Godwin; S. Otter-Nacke. 1985. CERES—Wheat. A simulation model of wheat growth and development. Texas A&M Univ. Press, College Station.

Smith, M.; D. Clarke; K. El-Askari. 1998. CROPWAT. Cropwat for Windows. User guide. FAO, Rome, Italy, 43 pg.

Steduto, P.; D. Raes; T. Hsiao; E. Fereres; L. Heng; G. Izzi; J. Hoogeveen. 2009. AquaCrop: a new model for crop prediction under water deficit conditions. *Options Méditerranéennes, Series A*, No. 80.285-292.

Stockle, C.; M. Donatelli; R. Nelson. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*. Volume 18, Issues 3-4, January 2003, pages 289-307.

Tapsuwan, S.; Johannes Hunink, Francisco Alcon, Aakfe N. Mertens-Palomares and Alain Baille. 2015. Assessing the design of a model-based irrigation advisory bulletin: the importance of end-user participation. *Irrigation and Drainage. Irrig. and Drain.* 64: 228–240 (2015). Published online 29 November 2014 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/ird.1887.

Unver, O.; Melvyn Kay, Konda Chavva, Amali Abraham Amali, Eva Pek, Maher Salma. 2020. Development for water, food and nutrition in a competitive environment-How NGOs and CSOs



are reshaping traditional farmer irrigation advisory services. *Irrig. and Drain.* 2021;70:431–447. DOI: 10.1002/ird.2444.

Vuolo, F.; Guido D’Urso, Carlo De Michele, Biagio Bianchi, Michael Cutting. 2015. Satellite-based irrigation advisory services: A common tool for different experiences from Europe to Australia. *Agricultural Water Management* 147 (2015) 82–95.

Wang E.; Robertson M.J.; Hammer G.L.; Carberry P.S.; Holzworth D.; Meinke H.; Chapman S.C.; Hargreaves J.N.G.; Huth N.I.; McLean G. 2002. Development of a generic crop model template in the cropping system model APSIM. *European Journal of Agronomy* 18, 121–140.



Instituciones participantes



Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria



Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria
URUGUAY



Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria



Secretaría Técnica Administrativa



Con el apoyo de:



www.fontagro.org

Correo electrónico: fontagro@fontagro.org