

PROGRAMACIÓN DEL RIEGO

Agosto, 2017

SERIE
TÉCNICA

232

INIA

PROGRAMACIÓN DEL RIEGO

Autores: Otero, Álvaro*
Montoya, Francisco*
García, Claudio***

* Ing. Agr. M.Sc., Programa de Investigación en Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA Salto Grande.

** Ing. Agr. Dr., Programa de Investigación en Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA Salto Grande (hasta Mayo 2016).

*** Ing. Agr. Dr., Programa de Investigación en Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA Las Brujas.

Título: PROGRAMACIÓN DEL RIEGO

Autores: Álvaro Otero, Francisco Montoya, Claudio García

Serie Técnica N° 232

© 2017, INIA

ISBN 978-9974-38-379-1

Editado por la Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología del INIA
Andes 1365, Piso 12. Montevideo - Uruguay
<http://www.inia.uy>

Quedan reservados todos los derechos de la presente edición. Esta publicación no se podrá reproducir total o parcialmente sin expreso consentimiento del INIA.

Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria

Integración de la Junta Directiva

D.M.T.V., Ph.D. José Luis Repetto - Presidente

Ing. Agr., MSc., PhD. Álvaro Roel - Vicepresidente



Ing. Agr. M.Sc. Diego Payssé Salgado

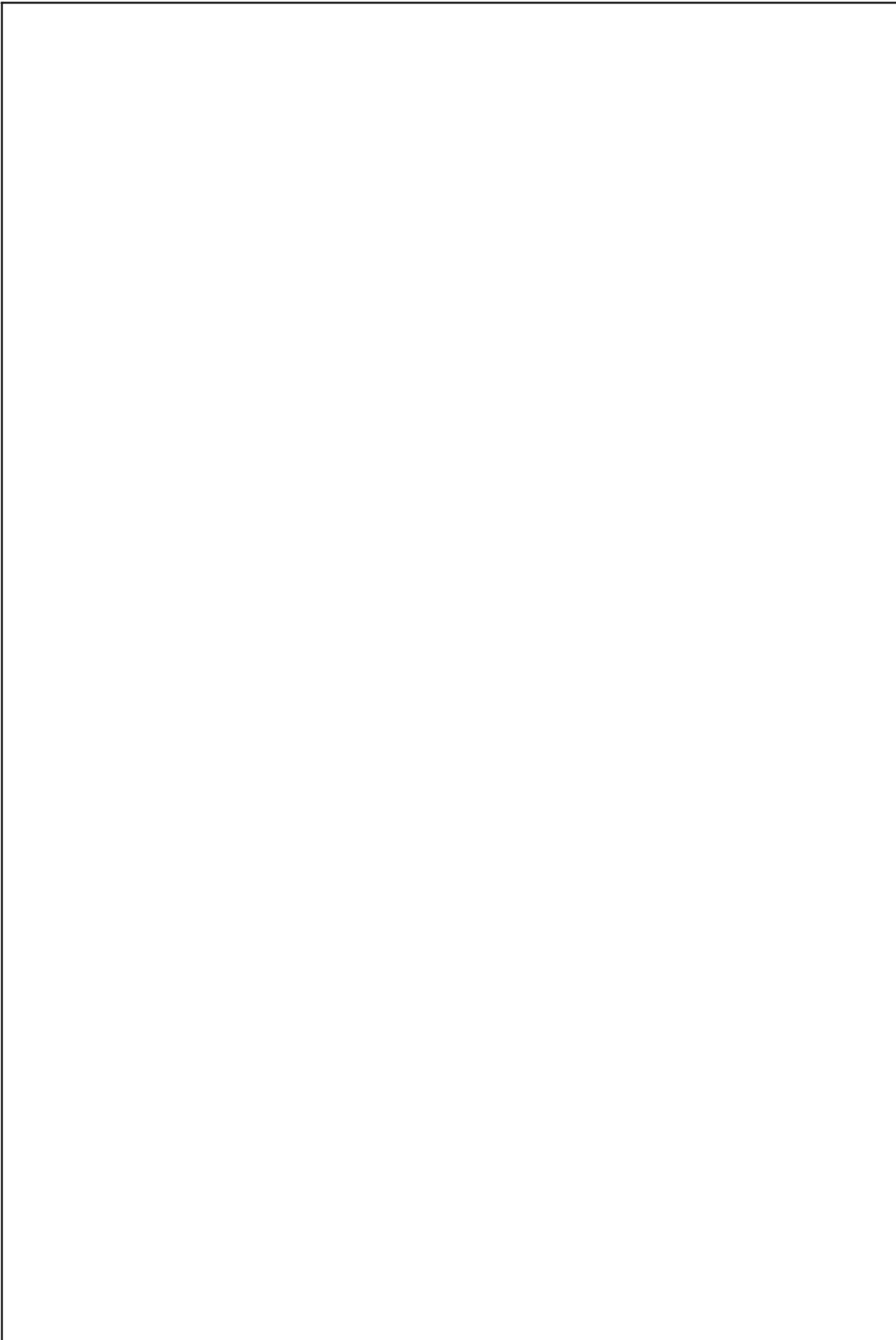
Ing. Agr. Jorge Peñagaricano



Ing. Agr. Pablo Gorriti

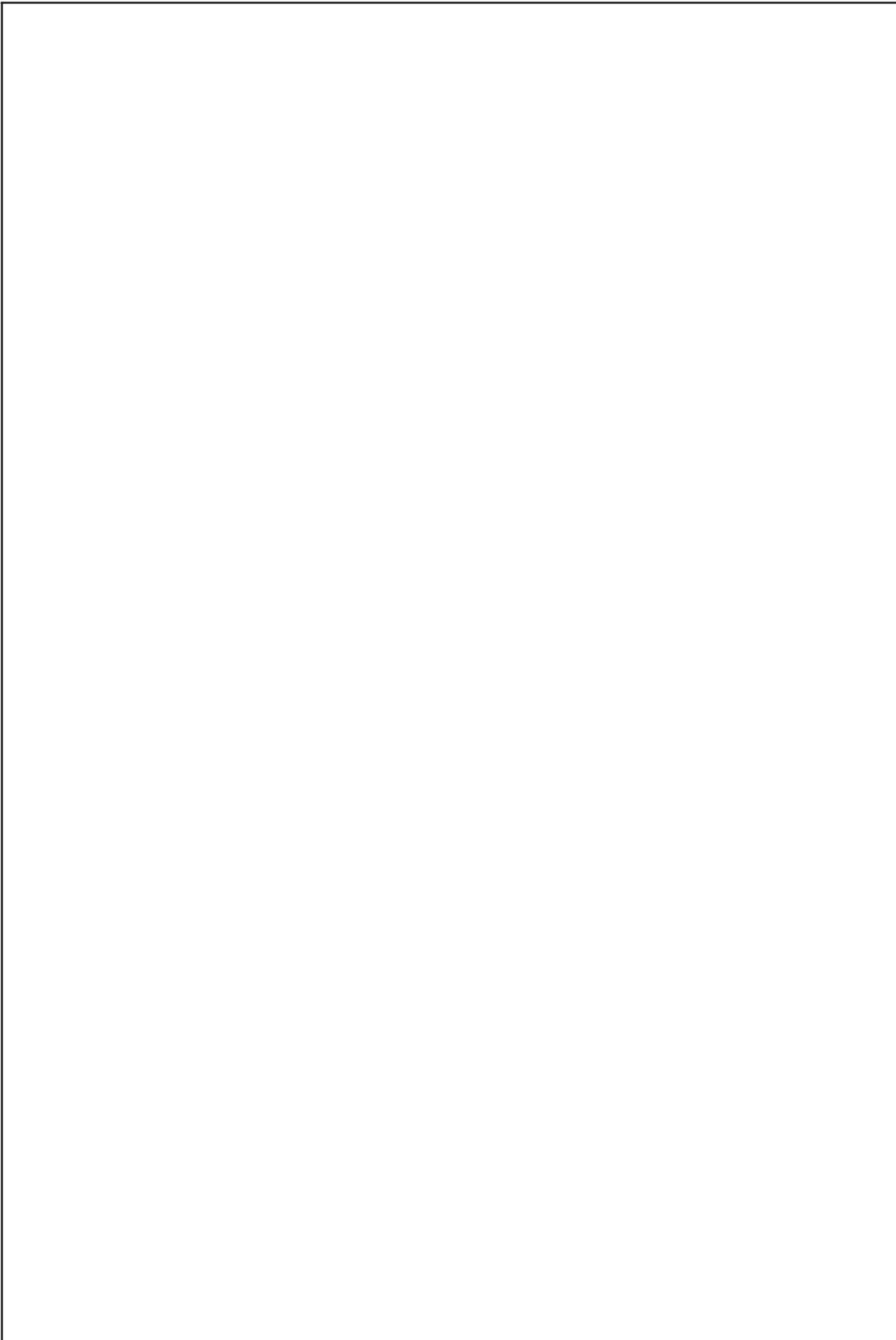
Ing. Agr. Alberto Bozzo





CONTENIDO

	Página
CAPÍTULO 1. PLANIFICACIÓN DEL RIEGO	1
1. INTRODUCCIÓN	1
2. PROGRAMACIÓN Y CONTROL DEL RIEGO	2
3. HERRAMIENTAS PARA EL CONTROL DEL RIEGO. BREVE DESCRIPCIÓN ...	5
3.1. Medidas del contenido de agua del suelo	5
3.2. Medidas basadas en la planta	9
3.3. Modelos de ayuda a la Toma de Decisiones en Riego	14
CAPÍTULO 2. APLICACIONES DE MODELOS DE BALANCE HÍDRICO DE SUELOS EN URUGUAY	17
1. LA PLANIFICACIÓN DEL RIEGO EN CLIMAS TEMPLADOS COMO URUGUAY .	17
Régimen pluviométrico	17
Régimen de la Demanda Atmosférica	18
Características físicas de los suelos	19
2. ESTRATEGIAS EN LA PLANIFICACIÓN DEL RIEGO A TRAVÉS DEL MODELO DE BHS	23
3. RESUMEN	29
CAPÍTULO 3. ESTIMACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DE AGUA PARA RIEGO EN CULTIVOS Y PASTURAS	31
1. INTRODUCCIÓN	34
2. ESTIMACIÓN BÁSICA DE LOS REQUERIMIENTOS DE AGUA PARA RIEGO DEL CULTIVO O PASTURA	34
3. ESTIMACIÓN DE LAS NECESIDADES DE AGUA DE RIEGO CON DIFERENTES ESTRATEGIAS DE PLANIFICACIÓN DEL MISMO. SEGUNDO OBJETIVO	39
4. RESUMEN	41
CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DEL MODELO AQUACROP COMO HERRAMIENTA PARA LA AYUDA EN LA TOMA DE DECISIONES EN RIEGO. CASO DEL CULTIVO DE SOJA EN SALTO	45
1. INTRODUCCIÓN	45
2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO AQUACROP	46
3. ENSAYO EXPERIMENTAL UTILIZADO PARA LA CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO AQUACROP	48
4. APLICACIÓN DEL MODELO AQUACROP	52
5. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL USO Y APLICACIÓN DEL MODELO AQUACROP	52
6. RESUMEN	58
BIBLIOGRAFÍA	59
ANEXOS	63



PRÓLOGO

Uno de los mayores desafíos para países agroexportadores como el Uruguay es satisfacer la creciente demanda mundial de productos agropecuarios, compatibilizando la imperiosa necesidad de mejorar la productividad y competitividad de los sistemas de producción, así como los estándares de calidad e inocuidad de sus productos, con un uso eficiente y sostenible de los recursos naturales relacionados a los procesos productivos.

El paradigma de la intensificación agropecuaria sostenible es un pilar estratégico de las políticas públicas del MGAP y del Plan Estratégico del INIA. Esto implica la búsqueda de mayor producción de alimentos y fibras de calidad en las tierras aptas, de forma eficiente, conservando los recursos naturales y mitigando los potenciales impactos ambientales negativos de los procesos productivos.

El riego suplementario es una de las herramientas de tecnología disponible no solo para incrementar la productividad, sino también para disminuir la variabilidad interanual en el rendimiento de los cultivos, especialmente los de verano, teniendo en cuenta la alta frecuencia de déficit hídrico del suelo durante los períodos estivales.

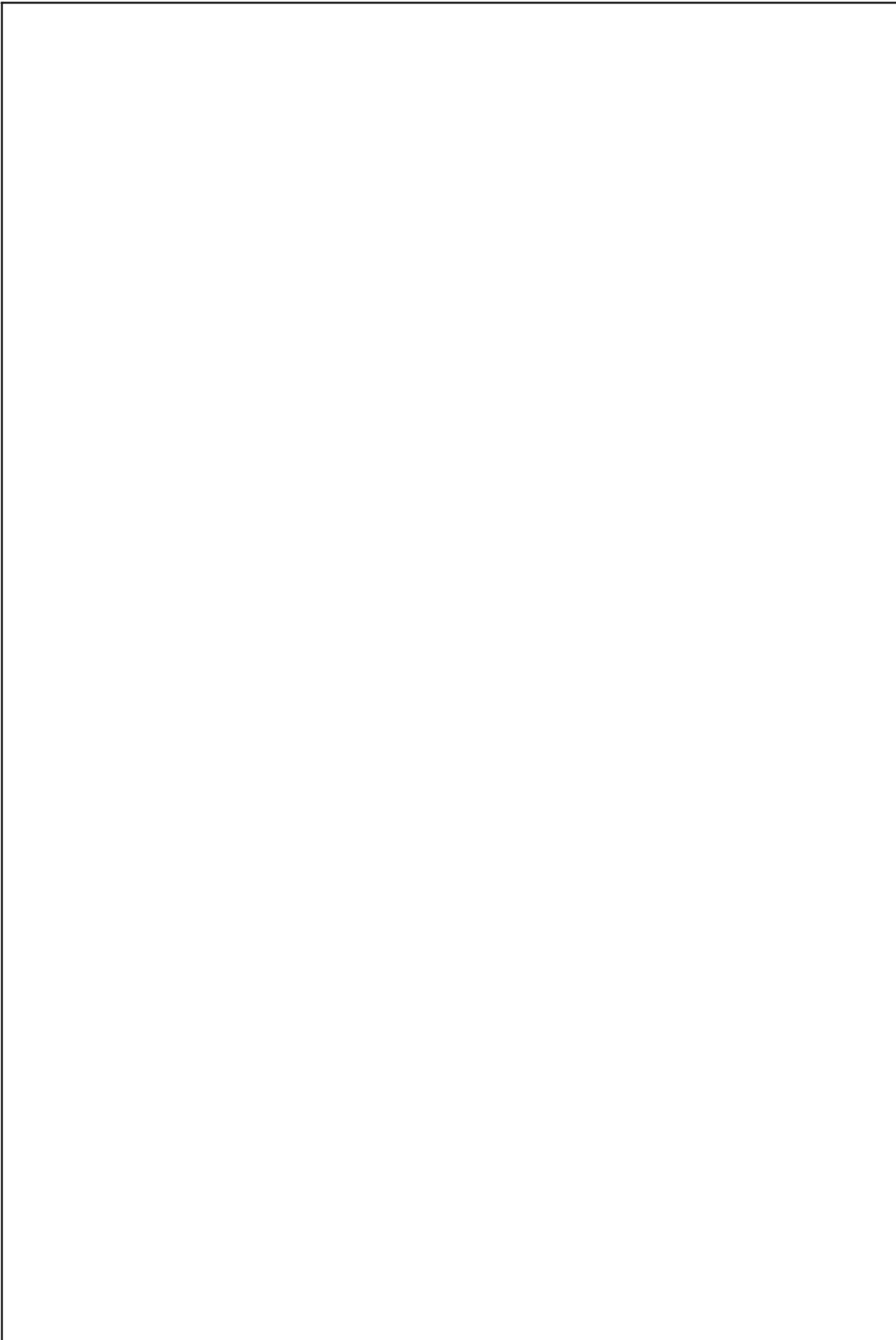
Desde el comienzo del siglo XXI, se ha incrementado notoriamente la superficie de cultivos de verano bajo riego, especialmente soja y maíz. Esta expansión del área de cultivos irrigados fue impulsada por la confluencia de iniciativas privadas y de políticas de desarrollo, que iniciaron el cambio tecnológico de cultivos en secano hacia cultivos con riego suplementario.

En este sentido, y teniendo en cuenta la poca experiencia en el riego de cultivos, con la excepción del arroz y de los cultivos de producción intensiva como los cítricos, los frutales, la vid y las hortalizas; se entendió apropiado la generación y/o adaptación de algunas herramientas que permitan mejorar la gestión y planificación de los sistemas de riego, que a su vez contribuyan al uso eficiente del recurso agua, y mejoren el resultado económico, a través del incremento del rendimiento y de la reducción de costos energéticos.

El presente trabajo, pone a disposición de técnicos y productores, algunos conceptos y herramientas generadas en varios proyectos ejecutados por INIA en los últimos años que buscan mejorar la gestión del riego a nivel predial. La publicación trata desde el concepto de planificación del riego y conocimientos disponibles para su control, pasando por herramientas de seguimiento y evaluación de diferentes estrategias de riego como ser los balances hídricos del suelos, hasta la presentación de requerimientos de riego de algunos cultivos, para terminar con herramientas más modernas de planificación del riego tales como los modelos (AquaCrop de FAO), que permite evaluación prediales y regionales de mayor alcance en el tiempo.

Ing. Agr., Ph.D., José A. Terra

Director Programa Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA Treinta y Tres



CAPÍTULO 1. PLANIFICACIÓN DEL RIEGO

Álvaro Otero*
Claudio García**
Francisco Montoya***

1. INTRODUCCIÓN

La imperiosa necesidad de satisfacer la demanda mundial de productos agropecuarios es la fuerza motriz de toda la intensificación agrícola. Tres grandes tendencias se combinan para guiar esta intensificación: a) crecimiento de la población mundial; b) creciente calidad de vida y cambios en la dieta de países con alta población y c) presiones sobre las áreas de tierras arables debido a las limitantes de expansión por competición con el urbanismo y por usos alternativos de las áreas de producción de alimentos (biocombustibles) (Hochman et al., 2013). Esta realidad mundial tiene consecuencias directas en el escenario actual y futuro de la agropecuaria nacional, intensificándose la superficie de cultivos, los sistemas agrícolas-ganaderos, así como el incremento del precio de la tierra. Dos de los varios atributos que podrían describirse en el proceso de la intensificación agropecuaria son: a) el incremento de la producción agropecuaria y b) el uso eficiente y responsable de los recursos limitados.

La agropecuaria uruguaya, más allá de su dinámica cambiante, se ha desarrollado en diferentes sistemas de producción, adaptados a las necesidades de cada región agroclimática y claramente vinculados al concepto de sustentabilidad productiva y económica de todo el sistema. Esta forma de encarar la producción se ha reflejado en la investigación agropecuaria desde sus comienzos (Castro, J.L., 1974). En esta línea de pensamiento, el riego suplementario de cultivos y pasturas, como parte esencial de los distintos sistemas productivos de Uruguay, se evi-

dencia como una de las tecnologías más promisorias en el impulso de una nueva etapa de desarrollo agropecuario de Uruguay (GDR, 2009).

La producción de cultivos en casi todas las regiones del mundo presenta una brecha importante entre los rendimientos potenciales y los rendimientos comúnmente alcanzados entre los productores. Esta brecha es intensamente estudiada a los efectos de identificar y cuantificar las limitantes más importantes para lograr los rendimientos potenciales (van Ittersum, M. et al., 2013). Cuando el agua es el factor de producción que limita la capacidad del cultivo para alcanzar su rendimiento potencial, hay que tener en cuenta que la eficiencia en el uso del agua, así como la cantidad total de agua utilizada y su distribución en el tiempo, representan los componentes más importantes para reducir dicha brecha.

Los óptimos requerimientos hídricos de un cultivo que permiten maximizar su rendimiento y calidad, así como su diseño agronómico correspondiente, son los elementos clave para el adecuado manejo y la planificación de un determinado sistema de riego (superficie, aspersión o goteo). Las necesidades de agua de los cultivos claramente van a depender del entorno agroecológico donde se encuentre el mismo, ya sea este un cultivo herbáceo o leñoso, de ciclo anual o pluri-anual.

Para la toma de decisiones en los sistemas productivos bajo riego es imprescindible contar con algunos conocimientos científicos y tecnológicos como son: los requerimientos hídricos del cultivo, de la respuesta del cultivo a distintos umbrales de contenido

* Ing. Agr., MSc. Programa de Investigación en Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA Salto Grande.

** Ing. Agr., Dr. Programa de Investigación en Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA Las Brujas.

*** Ing. Agr., Dr. Programa de Investigación en Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA Salto Grande (hasta Mayo 2016)



Foto 1. Lateral de pivot central. Salto.

de agua en el suelo, las ventajas e inconvenientes específicos de cada método de riego, la puesta en servicio del agua en la parcela (o chacra) (conducción por gravedad o a presión), el cronograma de aplicación del agua y de las implicancias económicas y financieras del uso de todo el sistema de riego (Smith et al., 1996).

2. PROGRAMACIÓN Y CONTROL DEL RIEGO

De acuerdo a Tarjuelo (2005), el objetivo del riego es suministrar a los cultivos y pasturas, de forma eficiente y sin alterar la fertilidad del suelo, el agua adicional a la precipitación que necesitan para su crecimiento óptimo y cubrir las necesidades de lavado de sales, en caso de que se requiera, de forma que evite su acumulación en el perfil del suelo, asegurando la sostenibilidad del regadío.

La técnica más extendida para realizar un adecuado manejo del agua en la agricultura bajo riego es la **programación de riego**, la cual identifica el momento y la cantidad de agua que se ha de aportar al cultivo en cada riego y cuyo manejo se puede realizar en base a diferentes criterios agronómicos (maximizar la producción total de la explotación agrícola, lograr el máximo beneficio económico, etc.). La aplicación de esta técnica requiere de un conocimiento amplio de los factores que condicionan los distintos procesos implicados. De entre los diferentes procesos, la evapotranspi-

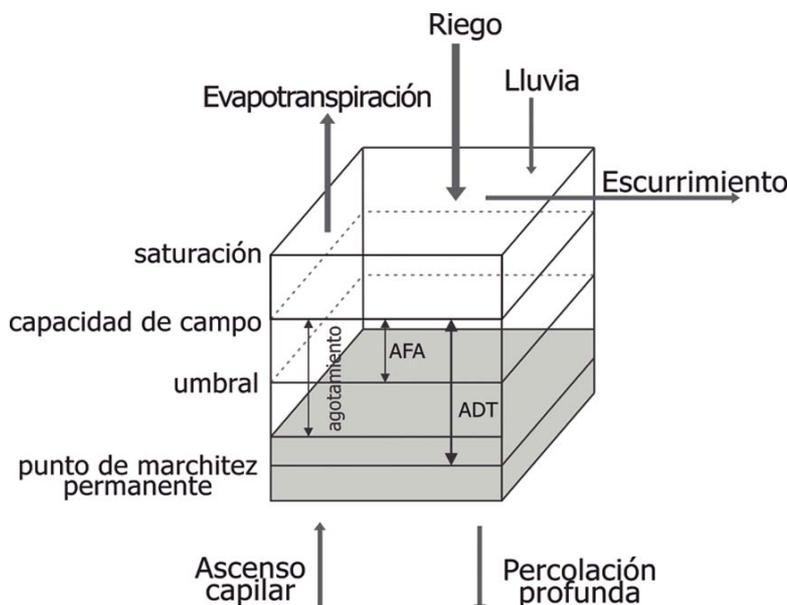
ración del cultivo es, sin duda, el más destacado, donde existe una amplia información publicada sobre este aspecto (Allen et al., 1998; Allen et al., 2011a; Allen et al., 2011b).

En esta serie técnica se pretende hacer referencia, de una forma resumida y comprensible al lector, a las distintas herramientas y metodologías de programación de riegos utilizadas, así como del método más extendido del balance del agua en el suelo.

El primer método se basa en el conocimiento del estado hídrico del suelo, bien sea a través del potencial hídrico (tensiómetros, resistencias) o del contenido de agua en el suelo medido a través de medidas directas (gravimetría) o indirectas (sonda de neutrones, o constante dieléctrica con sensores TDR o FDR).

El segundo método está orientado al conocimiento del estado hídrico del cultivo, pues este representa un balance entre lo que la planta es capaz de absorber del suelo y la demanda que existe en la atmósfera. Los diferentes métodos que se pueden utilizar son la medida del potencial hídrico en hoja (bomba de presión), conductancia estomática, temperatura de la cubierta vegetal, variaciones en el diámetro del tronco, entre otras metodologías.

El tercero de los métodos y, posiblemente, el que más se aplica de forma común es el modelo de balance del agua en el suelo. Este método se apoya en el conocimiento de las condiciones climáticas (demanda eva-



Donde:

AFA: agua fácilmente asimilable por el cultivo (se establece de acuerdo al umbral o nivel de agotamiento permisible) (mm);

ADT: agua disponible total en la zona radicular (mm)

Figura 1. Representación gráfica de los conceptos implícitos en un balance hídrico del suelo. Adaptado de: FAO 56. Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.

porativa de la atmósfera y precipitación), de las características físicas e hidráulicas del suelo así como en aspectos relacionados con el desarrollo del cultivo.

La figura 1 representa de forma esquemática el balance de agua en el suelo en la zona radicular, cuyo objetivo es la determinación del déficit de agua que existe en el suelo para un determinado período de tiempo (en general se usa el intervalo diario). Para el cálculo del balance se tiene en cuenta las entradas y las salidas al sistema (Fig. 1), donde la precipitación (P), el riego (I) y la ascensión capilar (CR) se consideran como entradas (disminuye el agotamiento de humedad del suelo en la zona radicular), mientras que las salidas del sistema son el escurrimiento (RO), la evapotranspiración del cultivo (ETc) y la percolación profunda (DP) (aumenta el agotamiento de humedad del suelo en la zona radicular) (Allen et al., 1998).

En el cálculo de la evapotranspiración del cultivo, donde se tiene en cuenta la evapotranspiración de referencia (ET_0) y el coeficiente de cultivo (k_c), Allen et al. (1998), hace una descripción detallada para su determinación.

$$D_i = D_{i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i - ETc_i + DP_i \quad (1)$$

donde:

- D_i : déficit de humedad en el suelo creado al final del período i considerado (mm);
- D_{i-1} : déficit de humedad en el suelo creado al final del período anterior al considerado (i-1) (mm);
- **P**: precipitación del período i (mm);
- **RO**: escurrimiento del período i (mm);
- **I**: lámina de riego neta que infiltra en el suelo en el período i (mm);
- **CR**: ascensión de agua en el suelo proveniente de agua subterránea en el período i (mm);
- **ETc**: evapotranspiración del cultivo en el período i (mm);
- **DP**: percolación profunda ocurrida fuera de la profundidad radicular en el período i (mm).

En definitiva, a través del balance de agua en el suelo se pretende determinar si el déficit de humedad creado en el suelo, es decir falta de humedad para alcanzar el punto de capacidad de campo, se encuentra por enci-

ma o por debajo de un determinado umbral de déficit (p). El valor de p se establece de acuerdo a criterios agronómicos, de forma que el rendimiento final del cultivo no se vea afectado por falta de agua. Cuando se alcanza dicho umbral es cuando se ha de proceder a realizar un riego, cuya lámina aplicada no debería exceder del agua fácilmente asimilable por el cultivo (AFA; Fig. 1). En el caso de practicar riegos de alta frecuencia (sistema de riego por goteo, pivote central o lateral de avance) la ecuación 1 se puede simplificar, de forma que el déficit de humedad en el suelo puede ser ignorado (Tarjuelo, 2005), permitiendo que las láminas de riego aplicadas sean acordes con la ETC.

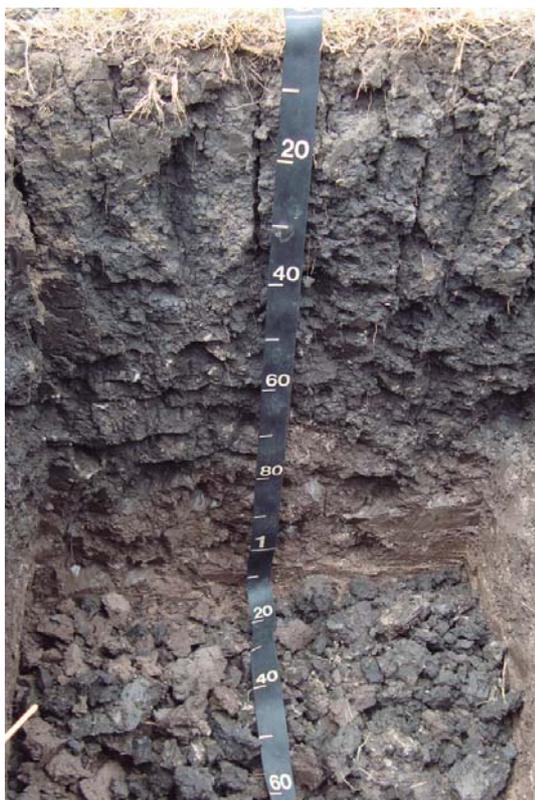


Foto 2. Brunosol Eutricto. Salto.

Cuando no existen problemas de suministro de agua y las necesidades hídricas del cultivo se pueden atender completamente, la programación del riego se lleva a cabo teniendo en cuenta:

- las necesidades hídricas del cultivo en cada etapa fenológica,

- la capacidad de almacenamiento de agua del suelo en la zona radicular,
- la respuesta del cultivo al contenido de agua en el suelo,
- la eficiencia de aplicación del sistema de riego y la calidad del agua de riego.

Sin embargo, no siempre es posible o deseable atender la totalidad de las necesidades hídricas del cultivo por diferentes razones: escasez de agua, alto precio del agua y/o la energía, búsqueda de alta calidad del producto mercadeable, entre otros aspectos. Por ello, con la programación del riego se pueden definir **estrategias de riego deficitario** que reduzcan significativamente el volumen de agua utilizada sin afectar el rendimiento de los cultivos. En este sentido es necesario conocer el ciclo de crecimiento y desarrollo del cultivo, así como los efectos del estrés hídrico sobre la producción y calidad, es decir, la incidencia del exceso o déficit hídrico en una determinada etapa de desarrollo.

Por tanto, a nivel de las chacras de producción bajo riego se puede indicar que la efectividad de la programación del riego y el adecuado manejo del sistema de riego está directamente relacionada con los siguientes aspectos:

- La sensibilidad del cultivo (o fase fenológica) al estrés hídrico.
- La relación entre el incremento del agua vs incremento de rendimiento (productividad del agua).
- La reducción de pérdidas de nutrientes y de suelo (impactos ambientales).
- La reducción en costos energéticos, a través de la correcta utilización del sistema de riego presente.

Esto da una idea de que en la realización de una correcta planificación del riego es necesario tener en cuenta el cultivo o combinación de éstos (necesidades de agua/fenología/profundidad de las raíces), el tipo de suelo (características físico-químicas e hidráulicas) y las específicas condiciones ambientales (demanda atmosférica/precipitación) que se están presentando durante el desarrollo del cultivo. En este sentido **el «mejor» plan de riego tiene que ser adaptado a las condiciones del productor** y debe de considerar:

- Ser sensible a pequeñas variaciones en el sistema (agua en el suelo, demanda de agua, y respuesta de la planta).
- Adaptable a las situaciones particulares de cada operación, especialmente en climas templados-subtropicales, como en Uruguay.
- Robusto y confiable.
- Uso amigable por el productor.
- Bajo costo y dedicación.
- Que se pueda automatizar.

Las nuevas y cada día más baratas tecnologías (sensores, comunicación, App's, etc.) nos permiten fácilmente integrarlas a los sistemas de ayuda en la toma de decisiones los cuáles contribuyen a lograr las anteriores metas de una manera más objetiva y eficiente, además de mejorar las propias limitaciones de utilizar un solo método de control o seguimiento del riego. Este concepto de eficiencia que podría parecer simple y fácilmente aceptado es especialmente importante para las condiciones de desarrollo y crecimiento de los cultivos y pasturas de primavera y verano, donde la variabilidad en la precipitación ocasiona períodos cortos de fuertes déficits hídricos. Dependiendo de cuándo se produzca este déficit, puede afectar de forma significativa en la reducción del rendimiento o en la tasa de crecimiento de los cultivos y pasturas.



Foto 3. Medición el contenido de agua en el suelo durante el crecimiento del cultivo de soja.

Como se ha indicado anteriormente, existen tres grandes metodologías para la monitorización del plan de riego, donde su empleo de forma individual o conjuntamente permite la implementación del plan de riego y el seguimiento y control de la eficacia del mismo. Debido a su importancia, en el siguiente epígrafe se hace una descripción de los principales aspectos a destacar en las diferentes metodologías.

3. HERRAMIENTAS PARA EL CONTROL DEL RIEGO. BREVE DESCRIPCIÓN

Existen en la literatura general muy buenas descripciones de las mejores herramientas para el control y monitoreo del riego (Campbell et al., 1982; Jones, 2004; O'Shaughnessy et al., 2012; Ha et al., 2013). En este espacio se pretende hacer una muy breve y práctica descripción de aquellos dispositivos o métodos más utilizados.

3.1. Medidas del contenido de agua del suelo

Agua en el suelo. Conceptos y definiciones previos

El suelo es el mayor reservorio de agua para la planta y las características físicas

de sus horizontes determinarán el grado potencial de almacenamiento de agua y disponibilidad para la planta; así como la capacidad de ser explorado por sus raíces.

Formas de expresión

Densidad Aparente del suelo (D_a)

$$D_a = \frac{\text{Peso seco del suelo}}{\text{Volumen imperturbado}} \times 100 \quad (2)$$

La densidad aparente del suelo presenta una alta variabilidad espacial en los suelos de Uruguay, y depende de la textura de los horizontes del suelo, de su estructura y de su compactación; a mayor espacio poroso total menor va a ser la D_a del horizonte. La pérdida de espacio poroso es una de las causas más importantes en la pérdida de almacenamiento de agua por los horizontes del suelo.

Contenido gravimétrico de agua en el suelo ($H_p\%$)

$$H_p = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso del suelo}} \times 100 \quad (3)$$

Contenido volumétrico de agua en el suelo ($H_v\%$)

$$H_v = \frac{\text{Volumen del agua}}{\text{Volumen del suelo (imperturbado)}} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{Como } H_p = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso del suelo}} \times 100$$

es igual a

$$\frac{\text{Volumen del agua} \times \text{Densidad del agua}}{\text{Volumen del suelo imperturbado} \times \text{Densidad aparente del suelo}} \times 100$$

Entonces,

$$H_v = H_p \times D_a \text{ y equivale a}$$

$$H_v = \text{mm de agua en la profundidad del suelo considerada y/o muestreada.}$$

Los siguientes conceptos que se relacionan a continuación hacen referencia a la figura 1 anteriormente expuesta.

CC - Capacidad de Campo es el contenido máximo de agua que el suelo puede retener entre sus microporos una vez que el agua gravitacional se ha perdido tras una intensa lluvia o saturación del suelo. En general, se corresponde con el contenido de agua en el suelo a los 2 días de haberse producido una intensa lluvia.

PMP - Punto de Marchitez Permanente es el mínimo contenido de agua del suelo en el cual las plantas manifiestan marchitez irreversible. Ésta no se puede recuperar aunque posteriormente se incremente el contenido de agua del suelo.

ADT - Agua Disponible Total en el suelo es el contenido de agua entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, equivalente a la capacidad de retención de agua del suelo en la zona radicular [mm/m] o en $H_v\%$ para cada horizonte.

AFA - Es igual al Agotamiento Máximo Permissible (AMP). El contenido de agua en suelo por encima del cual el cultivo no sufre estrés hídrico alguno.

Dr - Agotamiento de humedad del suelo en la zona radicular [mm]

Wr - Contenido de agua del suelo de la zona radicular, expresado como profundidad equivalente [mm]

P - Fracción de la ADT (umbral %) que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin sufrir estrés hídrico.

Método del tacto

Es quizás el método más antiguo y comúnmente utilizado por productores y técnicos. Consiste en tomar una muestra del suelo a la profundidad deseada y uniformizar (amasar) el suelo entre los dedos y posteriormente deslizar el mismo sobre el pulgar formando una cinta. Es un método que requiere práctica y conocimiento del suelo, pues relaciona para un suelo particular, la cantidad de agua del mismo con el agua que libere o la disposición final del suelo amasado sobre el pulgar.

Método gravimétrico. Consiste en tomar una muestra del suelo a una profundidad determinada (clásicamente con un taladro muestreador de suelos), pesar la muestra de suelo húmedo, luego colocarlo a secar en estufa (105 °C) y volver a pesar la muestra del suelo seco. La diferencia entre el peso de la muestra húmeda y la muestra seca, corresponde a la cantidad de agua de la muestra. Se expresa así en base al peso de la muestra original húmeda de campo y equivale al contenido gravimétrico (Hp %) de agua en el suelo.

$$Hp = \frac{\text{Peso húmedo de muestra} - \text{Peso seco de muestra}}{\text{Peso húmedo de muestra}} \times 100 \quad (5)$$



Figura 2. Taladro sinfín para muestreo de suelos.

Ventajas:

- Es muy rápida la medida de potenciales (mátricos) de agua en el suelo (0 a 120 cbar).
- Fáciles de instalar.
- Miden directamente la retención del agua por el suelo (unidades de presión).
- No están influenciados por el contenido de sales del agua del suelo. Esto es importante en condiciones de fertirriego o cultivos sin suelo.

Inconvenientes:

- No son de fácil mantenimiento, especialmente en suelos con arcillas expansivas, o para riegos deficitarios. Requieren mantenimiento periódico.
- En la práctica, funcionan muy bien hasta tensiones inferiores a 0,8 bar.

- No miden directamente el contenido de agua del suelo, sino su potencial de matriz (unidades de presión).
- La relación entre el contenido de agua (Hv%) y el potencial matricial (cbar) varía para cada tipo de suelo; esto es especialmente importante entre nuestros suelos arenosos y arcillosos con arcillas expansivas.



Figura 3. Tensiómetro. Spectrum Technologies.

Sensores de Capacitancia TDR/FDR

Los sensores TDR (*Time-Domain Reflectometry*) correlacionan la frecuencia (dependiente eléctrica) con las propiedades dieléctricas de los materiales, en nuestro caso el suelo, más precisamente con el contenido de agua en el suelo.

Los sensores de capacitancia como los FDR (*Frequency-Domain Reflectometry*) miden la constante dieléctrica del suelo para medir el contenido volumétrico de agua (Decagon, 2006) Como la constante dieléctrica del agua es mucho más grande que la del aire o la de los minerales del suelo, la constante dieléctrica del suelo es una medida muy sensible al contenido volumétrico de agua.

El contenido volumétrico de agua en el suelo se relaciona directamente con la permisibilidad dieléctrica del suelo porque la constante dieléctrica del suelo (80) es mucho más grande que la de los otros constituyentes del suelo como puede ser la materia orgánica (4), los minerales del suelo (4) o el aire (1). Por esto, los cambios en el contenido de agua en el suelo se pueden relacionar directamente con cambios en la capacitancia

(cambios en la permisibilidad dieléctrica) del mismo (millivolts).

Los sensores FDR son más baratos de construir y tienen una respuesta más rápida, que los TDR, sin embargo deben ser calibrados para diferentes tipos de suelos, algunas marcas comerciales han podido subsanar este inconveniente a través del uso de altas frecuencias, como son por ejemplo, las sondas *EnviroScan* o con calibraciones por categorías de suelos minerales u orgánicos, como son por ejemplo- los sensores Decagon (*10HS*).

Ventajas (FDR):

- Son muy precisos.
- Calibración depende del fabricante del sensor y del suelo.
- Miden directamente el contenido volumétrico (Hv%) de agua del suelo.
- Permiten automatización y redes de conexión inalámbrica.
- Costos han bajado sustancialmente.

Inconvenientes (FDR):

- Presenta problemas (requiere ajustes) en suelos con alto contenido en sales (CE).

- Es imprescindible un buen contacto con el suelo. Existen potenciales problemas en suelos con arcillas expansivas, muy frecuentes en nuestros suelos, en bajos contenidos de agua en el suelo.

Sonda de Neutrones

Mide la cantidad de neutrones de baja energía que son detectados por el sensor. La fuente de radiación emite los neutrones al suelo que en proporción al contenido de agua del mismo rebotan y son detectados. Los neutrones de alta energía emitidos por la fuente colisionan con los átomos de hidrógeno del suelo y los neutrones de baja energía son detectados por el sensor. El conteo por unidad de tiempo está relacionado directamente con el contenido de agua del suelo. Suelos secos tendrán bajos conteos, mientras que los suelos húmedos presentarán conteos altos en la misma unidad de tiempo.

El sensor debe ser introducido verticalmente en el suelo a través de un tubo metálico. A cada profundidad deseada se realiza el conteo. Estos dispositivos requieren siempre de calibración por la categoría textural del horizonte, en definitiva para cada suelo.



Figura 4. a. Sensor FDR y registrador (Decagon). b. TDR 300 (Spectrum Technologies).

Ventajas:

- Son de fácil uso, aunque requiere de cuidados en el manejo por tener una fuente radiactiva.
- Proporcionan una medida más real del contenido de agua del suelo, ya que el volumen de medición del suelo es mucho mayor (esfera de 15 cm de radio).
- Son precisos y consistentes en su medición.
- Fácil transporte.

Desventajas:

- Tiene una fuente radiactiva. Aunque son seguros se requiere de entrenamiento y responsabilidad.
- Son relativamente caros.



Figura 5. Sonda de neutrones, CPN (USA)

- No se pueden automatizar ni colocar en redes.
- Requiere de mayor uso de mano de obra.

Resumen

Las metodologías basadas en la medición del contenido de agua en el suelo, suelen ser de las más sencillas de aplicación y entender; en general tienen una buena a muy buena precisión y nos proporcionan información de cuánta agua fue evapotranspirada por el cultivo/pastura, en definitiva, la cantidad de agua que habría que suplementar al cultivo. Existe una oferta muy grande de estos sensores en el mercado, muchos de los cuales pueden ser incorporados a sistema automáticos de control y operación y/o a sistemas de registro de datos y comunicación GSM-web.

Por otro lado, sus valores individuales son difíciles de interpretar o de extrapolar en áreas con suelos heterogéneos (caso de algunas situaciones en nuestros sistemas de pivot central), especialmente debido a la alta variabilidad espacial del suelo. Al mismo tiempo, no toman en cuenta en sí mismos, la demanda atmosférica y la condición de estrés/bienestar del cultivo.

3.2. Medidas basadas en la planta

La planta es el verdadero sujeto de bienestar o estrés hídrico, donde el grado de bienestar o de estrés incide y se manifiesta directamente en el rendimiento o en la calidad de un producto vegetal. Este grupo de métodos están basados en mediciones directas sobre la planta y monitorizan las relaciones hídricas en la planta con tecnologías muy innovadoras (Jones, 2008).

Cuatro grandes grupos de metodologías son mayormente utilizadas con continuas innovaciones: potencial hídrico de la hoja, dendrometría, flujo de savia y termometría.

Potencial hídrico de la hoja

El potencial hídrico de la hoja expresa la variación energía libre en un punto (hoja) con diferentes contenidos molares de agua en la misma, dejando constante la temperatura, presión, etc. Representa el trabajo que debe ser necesario para mover una unidad de masa

del agua ligada a los tejidos, en referencia al que correspondería en el agua pura a una temperatura y presión dada.

Es una medida muy precisa en cuanto a su dimensión y relación con el contenido real de agua en la hoja, pero tiene el inconveniente que debe de seguirse un estricto protocolo de muestreo: la selección de la mejor hoja a medir y de la hora en que se realiza la misma en el campo. Esta técnica es muy utilizada en investigación, en el campo y en el laboratorio; a nivel de campo y producción también es utilizada en algunos países, principalmente en cultivos hortícolas y frutícolas.

El equipo más comúnmente empleado para éstas medidas es una cámara de presión (Sholander et al., 1965); también se pueden emplear psicrómetros con termocuplas.

Ventajas:

- Es un método relativamente barato.
- Ampliamente validado a nivel internacional.

c. Es muy preciso.

Desventajas:

- Requiere un estricto protocolo de trabajo (muestreo).
- Requiere bastante tiempo para la medición en comparación a otras técnicas.
- La cámara de Sholander no se puede automatizar, algunos los psicrómetros si se pueden automatizar.

Dendrometría

Generalizando podríamos decir que consiste en el grupo de medidas que cuantifican la dimensión individual de una planta (árbol) o alguno de sus órganos (frutos). Quizás la técnica más utilizada en riego es la medida de las variaciones en el diámetro de diferentes órganos: tallo, tronco, frutos. El diámetro de los órganos está directamente relacionado con el crecimiento, y en definitiva, con el contenido de agua de los mismos. Aumentos consecutivos en el diámetro del tronco o del fruto implicaría aumen-



Figura 6. Cámara de presión tipo Sholander (Soilmoisture, USA)



Figura 7. Dendrómetro en tronco de cítricos (D6, UMS).

tos en su tamaño (crecimiento). Por otro lado, las variaciones diarias en este diámetro están relacionadas con la variación diaria en el estado hídrico del órgano. El diámetro de los órganos vegetales describe una evolución rítmica a lo largo del día, con un valor máximo, que se alcanza al final de la noche (período donde es máxima la hidratación de los órganos) y un valor mínimo, que se alcanza hacia medio día, cuando la transpiración de la planta es máxima. La contracción del tronco diurna anormal indica la presencia de estrés hídrico en la planta, y esto puede usarse para fijar el límite inferior del contenido de humedad en el suelo permitido (Goldhamer et al., 1999).

Ventajas:

- Adaptación a diferentes estrategias de riego, especialmente en riego deficitario.
- Medidas continuas y no destructivas de la planta.
- Capacidad de ser automatizables en tiempo real.

Desventajas:

- Actualmente de alto costo.
- Otros factores (estreses) pueden estar afectando la contracción o el diámetro del órgano.

- Requieren calibración, incluso con la cantidad de agua aplicada en el riego.
- d. Se debe de calibrar la evolución del diámetro (variaciones en el incremento del diámetro o contracciones) con el grado de estrés.
- e. Alta sensibilidad, la utilización exclusiva de esta medida tiene dificultades de para ser incorporada a sistemas de toma de decisiones.

Flujo de savia

Son técnicas que procuran medir la velocidad y la cantidad del flujo vascular (xilemático) de la planta y están muy relacionadas con la transpiración de la planta. Los cuatro métodos más frecuentemente utilizados son: a) Método de balance térmico de tallo, b) Método de balance térmico de tronco, c) Método de pulsos térmicos y d) Método de disipación térmica.

a) El *método de balance térmico de tallo* (Steinberg et al., 1989; Baker y van Bavel, 1987), aplica calor en una circunferencia entera alrededor del tallo y el flujo masal de savia es obtenido a través del balance de flujo de calor hacia dentro y hacia fuera de la sección del tallo calentada. El calor aplica-

do puede ser contante o por pulsos, dependiendo del dispositivo comercial.

b) El *método de balance térmico de troncos* (Ėermak et al., 1984) fue desarrollado para troncos leñosos. Al igual que el método de balance térmico de tallos está basado en el principio de que la velocidad de la savia puede ser determinada a través del balance térmico del calentamiento de un tejido. Sin embargo, en este caso el calor se aplica solo en una sección internamente del tronco, más que superficialmente en la entera circunferencia alrededor del tallo.

c) El *método de pulsos térmicos* (Swanson, 1994) es utilizado únicamente en trocos leñosos. La velocidad del flujo de savia es medida determinado la velocidad de pequeños pulso de calor aplicado llevado a cabo por el movimiento ascendente xilemático de savia, más que por el balance térmico de los tallos calentados.

d) El *método de disipación térmica* (Granier, 1985) El calor es aplicado en forma constante y la diferencia de temperatura entre las dos sondas es dependiente de la velocidad del movimiento de la savia alrededor de las sondas, si la velocidad del movimiento del flujo xilemático se incrementa; el calor es disipado más rápidamente y en con-

secuencia la diferencia de temperatura entre las sondas disminuye.

Ventajas:

- Dependiendo del tipo de cultivo, son buenos estimadores de la transpiración de la planta.
- Medidas continuas y no destructivas de la planta.
- Capacidad de ser automatizables en tiempo real.
- Son de bajo costo.

Desventajas:

- Requieren calibración, incluso con la cantidad de agua aplicada en el riego.
- Se debe de calibrar la evolución de la transpiración diaria.
- Alta sensibilidad, la utilización exclusiva de esta medida tiene dificultades de ser incorporada a sistemas de toma de decisiones.

Temperatura de la canopia

La temperatura de la superficie de los cultivos nos permite evaluar el grado de estrés hídrico del mismo. En este sentido, cuando una planta o cultivo transpira, las



Figura 8. a) Sonda de balance térmico de tallo (Dynamax); b) Sonda de disipación de calor (Dynamax).

hojas se enfrían por debajo de la temperatura del aire por evaporación directa del agua. A medida que el cultivo se va estresando por falta de agua, el cierre estomático reducirá la transpiración y en consecuencia la temperatura de la superficie del cultivo se incrementará (Jackson, 1982).

Teniendo en cuenta este proceso fisiológico, diferentes autores desde los años 80's han propuesto relaciones de la diferencia entre la temperatura del aire y la temperatura de la canopia, con diferentes demandas atmosféricas e incorporando su dependencia para los cultivos con total disponibilidad de agua o en sequía (Idso, 1981,1982; Jackson, 1981).

El Índice de Estrés Hídrico de los Cultivos (CWSI, siglas en inglés), es quizás el más conocido:

$$IEHC = \frac{dT - dTi}{dT_s - dTi}$$

donde:

- **dT** es la diferencia entre la temperatura de la canopia y la temperatura del aire (Tc-Ta)

- **dTs** es el límite superior de Tc-Ta en plantas que no transpiran (alto grado de estrés)
- **dTi** es el límite inferior de Tc-Ta en plantas muy bien regadas (alta tasa de transpiración)

El IEHC (CWSI) con valor de 1 significa que el cultivo no transpira por lo tanto está en un estado de alto estrés hídrico, mientras que si esté en un valor de 0 (cero) el cultivo está transpirando a plena capacidad, con alto contenido de agua.

Es un grupo de técnicas, que apoyadas en las innovaciones de los nuevos dispositivos, está en plena expansión y adopción. La incorporación de radiómetros en el espectro infrarrojo termal de menor costo (DeJonge, 2015), así como de cámaras infrarrojas (Jones, 1999; Jones et al., 2002) han permitido un desarrollo muy amplio de los conceptos propuestos en los años 80. Especialmente con aplicaciones prácticas ya sean desde plataformas aéreas (drones, aviones, satélites); así como incorporados a la automatización de pivots; en este último caso incorporando además nuevos conceptos y

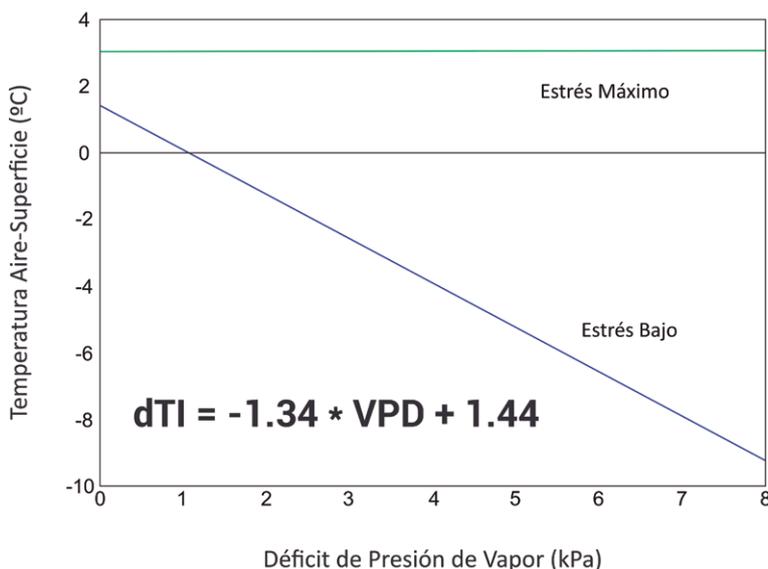


Figura 9. Ejemplo de línea de base del Déficit de Presión de Vapor para soja. Adaptado de: U.S. Water Conservation Laboratory in Phoenix, Arizona.

- La línea verde representa la diferencia entre la Tc – Ta indicando el máximo estrés en el cultivo de soja.
- La línea azul representa el valor de la diferencia entre la Tc-Ta que indica un nulo grado de estrés para Déficit de Presión de Vapor (DPV).
- La pendiente y el intercepto de estos valores deben ser obtenidos para cada cultivo y región.

análisis del tiempo térmico en los cultivos por encima de diferentes umbrales de temperatura de la canopia (Evetts et al., 2002).

El sensoramiento remoto a su vez ha permitido observar la temperatura de la superficie de los cultivos, posibilitando evaluar la variabilidad espacial de los estreses hídricos y en consecuencia la uniformidad del riego aplicado, en contraposición a la observación de solo algunos puntos en el campo.

3.3. Modelos de ayuda a la Toma de Decisiones en Riego

Se han desarrollado varios modelos como soporte a la toma de decisiones en la programación y evaluación del riego. Estos modelos pueden ser utilizados para evaluar distintos planes de riego en diferentes escenarios climáticos y de cultivos, ya sea tanto a escala parcelaria como de chacra. Algunos ejemplos de estos son: CROPWAT (Smith, 1992), WinISAREG (Teixeira y Pereira, 1992), SIMDualKc (Rolim et al., 2006), AQUACROP (Steduto et al., 2009), CROPIRRI (Zhang y Feng, 2010), MODERATO (Bergez et al., 2001) y PLANTE-INFO (Thyssen y Detlefsen, 2006). Algunos de estos métodos están basados solamente en balances de agua en el suelo, siguiendo fundamentalmente la guía FAO-56 (Allen et al., 1998), mientras que los otros incorporan además, parámetros del crecimiento y desarrollo del cultivo para simular su rendimiento, lo que permite un mayor análisis y seguimiento por parte de técnicos y productores.

Algunas ventajas de estos modelos consisten en la incorporación de los requerimientos de agua por la planta debida de la demanda atmosférica. También requieren una apropiada selección de los parámetros de los cultivos y del suelo.

En general y desde un punto de vista muy práctico, los modelos basados en la ayuda a la toma de decisiones permiten estudiar diferentes estrategias de riego, considerar diferentes opciones de los sistemas de riego y, además, pueden ser basados en la web: en términos de las entradas al modelo, en la automatización de la entrada de datos cli-

máticos y en la consulta a diferentes dispositivos en el campo.

Modelos de balances hídricos del suelo (BHS)

Los modelos de balance hídrico del suelo permiten simular las variaciones del contenido de agua del suelo para un determinado cultivo o secuencias de cultivo dado unas condiciones meteorológicas y/o de riego preestablecidas. Estos modelos son una herramienta muy apropiada en la planificación de diferentes estrategias de riego, en la evaluación posterior de las condiciones de agua en el suelo y el comportamiento productivo del cultivo, así como de determinar el uso consuntivo del agua por el cultivo a través de la evolución diaria del contenido de agua en el suelo.

Existen una gran variedad de modelos de balance hídrico del suelo. Muchos de ellos basados, con pequeñas modificaciones locales de la metodología propuesta por la guía FAO 56 (Allen et al., 1998). Dentro de estos el modelo de simulación ISAREG (Teixeira y Pereira, 1992) fue desarrollado para evaluar diferentes estrategias de riego. Permite evaluar, a través del balance de agua del suelo a nivel predial, diferentes alternativas o programas de riego para distintos cultivos y en diferentes escenarios de producción. Una de las características importantes de este modelo es que toma los valores simples de Kc del cultivo, sin discriminar en sus componentes (Kcb y Ke). La propuesta de utilizar el Kc doble fue incorporado posteriormente en otro desarrollo del mismo autor SIMDualKc (Rolim et al., 2006), donde es posible discriminar mejor el componente de evaporación del suelo y el de transpiración al inicio de la instalación de un cultivo (Allen et al., 2005). Tanto el modelo ISAREG como el SIMDualKc han sido evaluados y calibrados en varias ocasiones en las condiciones productivas de Uruguay con muy buena precisión, ya sea en cultivos (García Petillo, 2010; Giménez y García Petillo, 2011; Giménez et al., 2016); como en plantaciones de cítricos (Otero y Goñi, 2008).

En la simulación de diferentes estrategias de riego el usuario puede (Fortes et al., 2005):

- Definir un programa de riego para maximizar el rendimiento, ejemplo: Sin estrés hídrico alguno.
- Definir un programa de riego usando umbrales de riego seleccionados, permitiendo períodos de estrés hídrico y respondiendo a las restricciones hídricas impuestas en esos períodos.
- Evaluar el impacto del rendimiento y el agua en un determinado programa de riego.
- Comprobar el comportamiento del modelo con valores observados del contenido de agua en el suelo usando fechas y láminas de riego reales.
- Ejecutar balances de agua en el suelo sin la aplicación de riego.
- Calcular los requerimientos de riego de un cultivo; incluyendo el análisis de la frecuencia de estos requerimientos, cuan-

do distintas series de datos climáticos son consideradas.

El modelo puede ser corrido en intervalos diarios, decádicos o mensuales de acuerdo a la base de datos meteorológicos utilizada. Asimismo, puede producir salidas para un solo ciclo del cultivo o para varios años consecutivos. Brevemente, el modelo consta de la integración de otros dos submodelos asociados: EVAP56 y KCISA. El primero nos permite el cálculo de la evapotranspiración de referencia a través del método de Penman-Monteith FAO-56 (Allen et al., 1998) y el segundo nos permite estimar el Kc simple para los cultivos en diferentes situaciones de manejo, usando también la metodología propuesta por FAO-56.

Esquemáticamente el modelo Winsareg consta de varias partes como se observa en la figura 10 (Fortes et al., 2005).

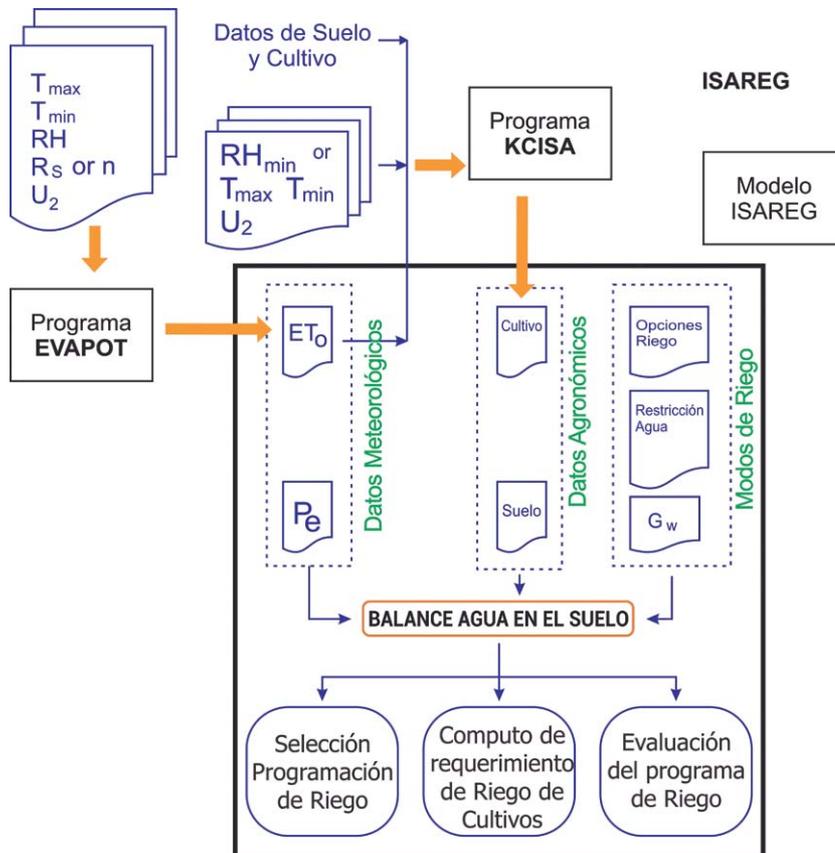


Figura 10. Diagrama de entradas y salidas del modelo de simulación Winsareg (Fortes et al., 2005).

CAPÍTULO 2. APLICACIONES DE MODELOS DE BALANCE HÍDRICO DE SUELOS EN URUGUAY

Álvaro Otero*

1. LA PLANIFICACIÓN DEL RIEGO EN CLIMAS TEMPLADOS COMO URUGUAY

El territorio continental del Uruguay se encuentra comprendido en la zona templada. Aunque entre distintos puntos del país es posible observar diferencias en los parámetros climáticos, estas diferencias no son de magnitud suficiente como para distinguir diferentes tipos de clima dentro del territorio de Uruguay de acuerdo a clasificaciones clásicas como la de Koeppen. Uruguay puede ser clasificado «Cfa» (Bidegain, M. y R.M. Caffera, 1997).

Desde el enfoque de la gestión y manejo del riego hay algunos factores que son determinantes en el éxito de una correcta pla-

nificación, debiendo ser considerados *a priori* para el correcto diseño de los sistemas de riego más apropiados para Uruguay, así como para su correcta programación.

Régimen Pluviométrico

Teniendo en cuenta los datos provenientes de las estaciones agroclimáticas de INIA, durante el período 1980 a 2015, podemos apreciar una distribución la precipitación acumulada promedio mensual relativamente semejante entre meses, para Rincón del Colorado (Canelones) y Treinta y Tres; mientras que en Salto, Colonia y Tacuarembó se evidencia una clara tendencia a que los meses invernales presenten menor precipitación promedio mensual (Figura 11). Comparando la

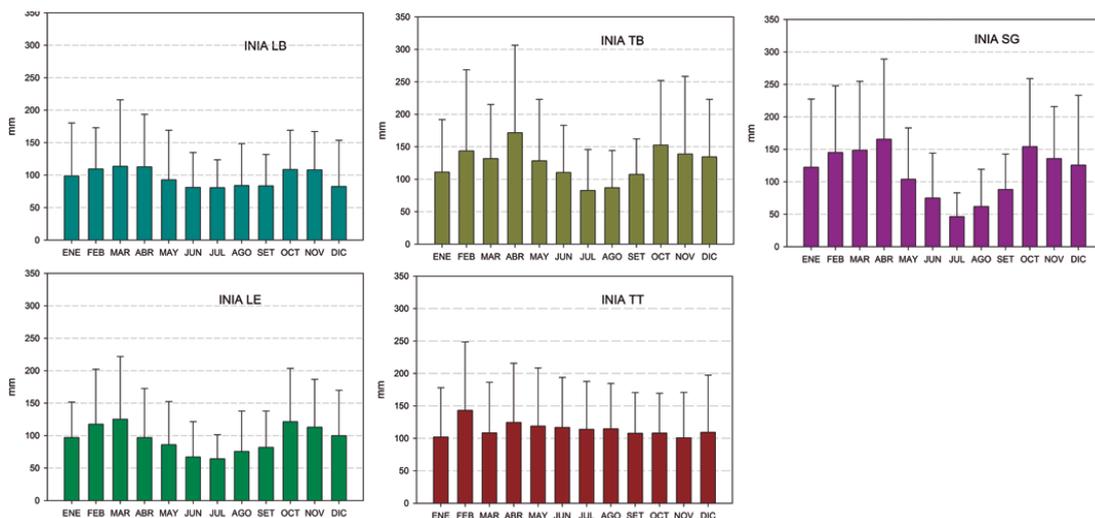


Figura 11. Distribución de la precipitación promedio acumulada mensual (mm) en las estaciones experimentales de INIA. La barra corresponde al desvío estándar mensual para el período 1980 a 2015.

* Ing. Agr., MSc. Programa de Investigación en Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA Salto Grande.

variación entre años de la precipitación promedio mensual (Fig. 11), se puede observar una altísima variabilidad para un mismo mes en años diferentes. Estas diferencias en la precipitación mensual trae consigo un importante volumen de agua que no queda retenido en el suelo debido al escurrimiento superficial, lo que obliga –sin poderlo predecir con la suficiente anticipación– a diseñar sistemas que por un lado maximicen la incorporación de agua de lluvia en el perfil y, por otro lado, que permitan quitar el agua de las

chacras con rapidez y eficiencia, sin que se produzca erosión significativa del suelo.

Régimen de la Demanda Atmosférica

La evapotranspiración de referencia (PM-56), presenta un régimen diferente al régimen de precipitación. La evapotranspiración de referencia tiene una estacionalidad mucho más marcada y con pequeñas diferencias entre la estaciones de INIA. Esta esta-

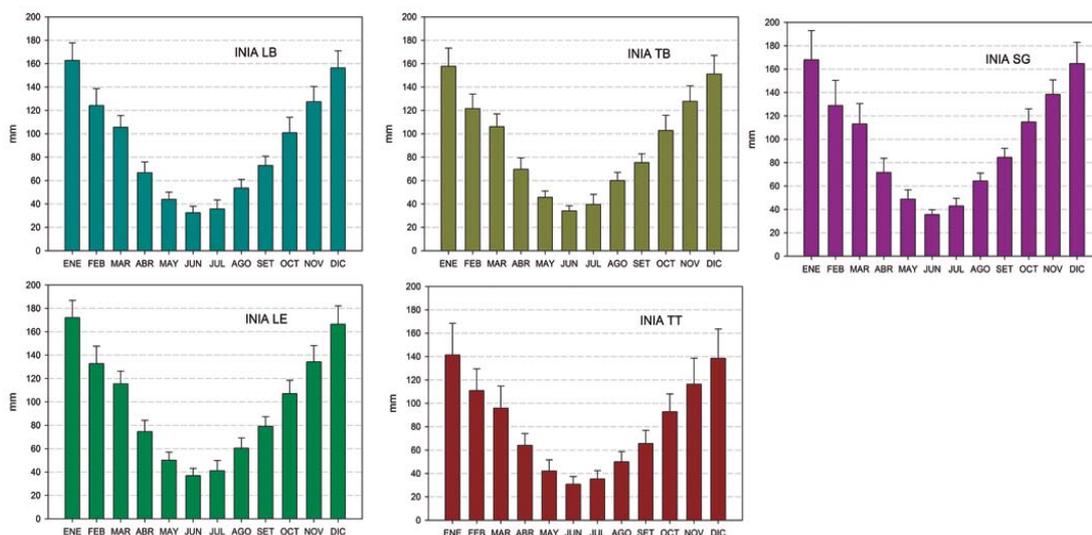


Figura 12. Distribución de la evapotranspiración de referencia (PM-56) promedio acumulada mensual (mm) en las estaciones experimentales de INIA. La barra corresponde al desvío estándar para el período 1980 a 2015.

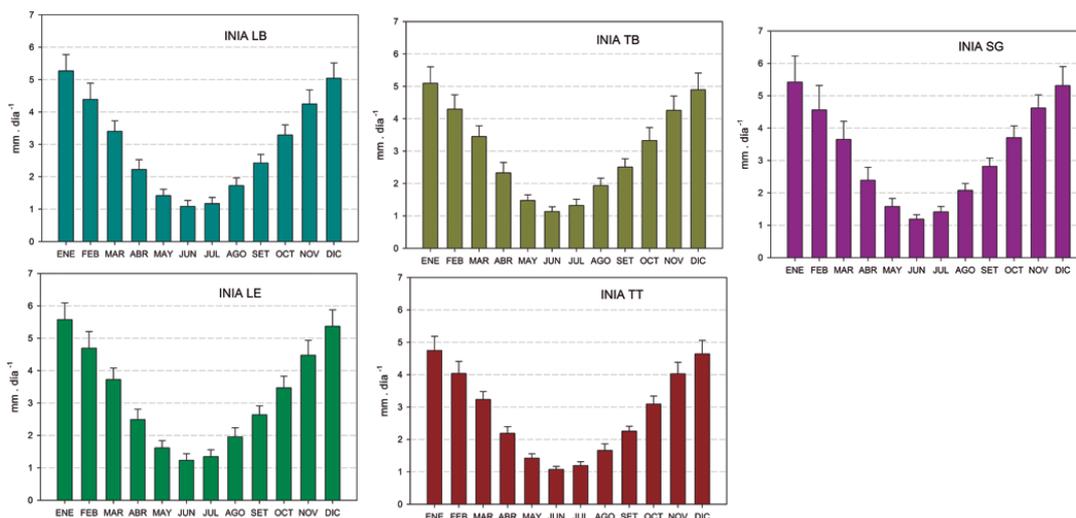


Figura 13. Distribución de la evapotranspiración de referencia (PM-56) promedio diario mensual (mm) en las estaciones experimentales de INIA. La barra corresponde al desvío estándar para el período 1980 a 2015.

cionalidad muestra los máximos valores mensuales acumulados promedio en los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero (Figura 12), con valores promedio de 120 a 160 mm mensuales en dichos meses.

Por otro lado, la variabilidad encontrada entre años para el mismo mes es relativamente baja si la comparamos con la variabilidad entre años de la precipitación (Figura 13), con valores promedios diarios entre 4,5 y 5,5 mm día⁻¹ en los meses de mayor demanda atmosférica. Al mismo tiempo podemos ver la alta diferencia en la evapotranspiración entre los meses invernales y los meses de verano. Esta estacionalidad muy marcada ocasiona excesos y déficit de agua en el suelo, bien característicos de nuestro país.

Características físicas de los suelos

La infiltración superficial y el almacenamiento de los suelos son dos características importantes a tener en cuenta en el diseño y la planificación del riego. Los suelos de Uruguay presentan una variabilidad importante en la velocidad de infiltración básica, no solo entre los principales tipos de suelos sino también entre los mismos suelos en diferentes condiciones de manejo o topográficas

(Cuadros 1 y 2). La infiltración de algunos suelos es tan baja que permite realizar satisfactoriamente riegos por inundación, como es el caso del cultivo de arroz. En otros suelos, con texturas francas y franco-arenosas y alta velocidad de infiltración, se han priorizado su uso para el desarrollo de cultivos leñosos como los cítricos. Cuando se planifican una transformación en riego de una chacra, donde se buscan altas eficiencias de aplicación de agua y uniformidad de distribución, y donde además se tienen inversiones por hectárea relativamente altas, es importante que los valores promedio de la infiltración de la chacra deban ser detalladamente medidos, a fin de evitar errores en el diseño del sistema de riego. En este sentido, un ejemplo típico de error durante la fase de diseño de los sistemas de riego pivote es la falta de acuerdo entre la curva de pluviosidad en el extremo de la máquina y la curva de velocidad de infiltración del suelo, donde una inadecuada selección de los aspersores, velocidad de avance, anchura mojada e incluso la longitud total del equipo ocasionaría problemas importantes de erosión del suelo por escurrimiento superficial.

En términos del diseño del equipo de riego, la velocidad de infiltración promedio por sí sola es una orientación de lo que se tiene en la chacra, donde puede existir una

Cuadro 1. Velocidad de infiltración (mm h⁻¹) de algunos suelos uruguayos.

Unidad de suelo	Tipo de suelo	Velocidad de infiltración (mm h ⁻¹)
TI-Rd	Brunosol Subéutrico Típico	1,2
TI-Rd	Argisol Éutrico Lúvico	1,2
To	Brunosol Éutrico Lúvico	6,3
EP-LB	Brunosol Éutrico Típico	10
To	Argisol Subéutrico Ócrico	10
TI-Rd	Brunosol Subéutrico Típico	20
Ch	Brunosol Subéutrico Típico	42,5
To	Brunosol Éutrico Lúvico	42,5
TI-Rd	Brunosol Subéutrico Típico	51,5
To	Brunosol Subéutrico Típico	68,8

TI-Rd: Tala-Rodríguez; To: Toledo; EP-LB: Ecilda Pauller-Las Brujas; Ch: Chapicuy.
Fuente: adaptado de Terzaghi y Sganga (1998).

Cuadro 2. Velocidad de infiltración (mm h^{-1}) con infiltrómetro de doble anillo.

Unidad de suelo	Tipo de suelo	Velocidad de infiltración (mm h^{-1})
TI-Rd	Brunosol Subéutrico	1
SC	Argisol Subéutrico Melánico	1
	Brunosol Subéutrico	1
TI-Rd	Brunosol Éutrico	1
TI-Rd	Brunosol Subéutrico	4
CñN	Brunosol Subéutrico	4
SG-G	Brunosol Subéutrico	4
CñN	Brunosol Éutrico	4
CC	Brunosol Subéutrico	6
To	Brunosol Subéutrico	6
EP-LB	Brunosol Éutrico	7
St	Argisol Dístrico Ócrico	23
Af	Argisol Subéutrico Melánico	23
EP-LB	Brunosol Éutrico	53

TI-Rd: Tala-Rodriguez; To: Toledo; EP-LB: Ecilda Pauller-Las Brujas; SC: San Carlos; CñN: Cañada Nieto; SG-G: San Gabriel-Guaycurú; CC: Cuchilla de Corralito; St: Salto; Af: Alferes. Fuente: adaptado de VÍctora et al. (2000).

variabilidad muy alta como se observa en la figura 14. En este estudio en concreto se muestreó un total de 30 puntos por tipo de suelo, distribuidos de acuerdo a la figura 15, considerándose suficiente para representar la superficie total de estudio, así como la distribución de suelos en la chacra. Ante la variabilidad observada, es imprescindible ajustar correctamente el diseño del sistema de riego a estas variaciones en la infiltración.

Un correcto muestreo, con suficiente número de muestras de infiltración de acuerdo a la distribución de suelos en la chacra que se quiera regar, permitiría seleccionar la pluviometría del sistema de riego en función de los valores más frecuentes, en vez de usar el valor medio de la infiltración, muchas veces obtenido de bibliografía y pocas veces correctamente medidos.

Este caso concreto de estudio se realizó sobre un suelo regado bajo sistema de riego pívot (Fig. 15), donde la frecuen-

cia de distribución de velocidad de infiltración básica se encontró entre 2 y 3 mm/h , principalmente (Fig. 16), siendo muy similares a los indicados en el cuadro 2. En este sentido, junto a la variabilidad observada en las curvas de velocidad de infiltración (Fig. 14), se hace necesario la búsqueda de alternativas de manejo del riego extras en caso de que el ajuste de la curva de infiltración del suelo y la pluviometría de los aspersores no sea bueno en todas las áreas bajo el pívot, ya sea por excesos de pluviometría o déficit de la misma. Así, la creación de pequeñas «bateas» en la superficie del suelo entre las líneas de plantación es una alternativa potencial en zonas de suelos con muy baja infiltración, permitiendo que el agua de riego permanezca retenida en la superficie del suelo por mayor tiempo y en definitiva mejorar la entrada de agua al suelo. Es de destacar que esta tecnología, utilizada en otros países, aún no ha sido explorada o validada en nuestros sistemas productivos.

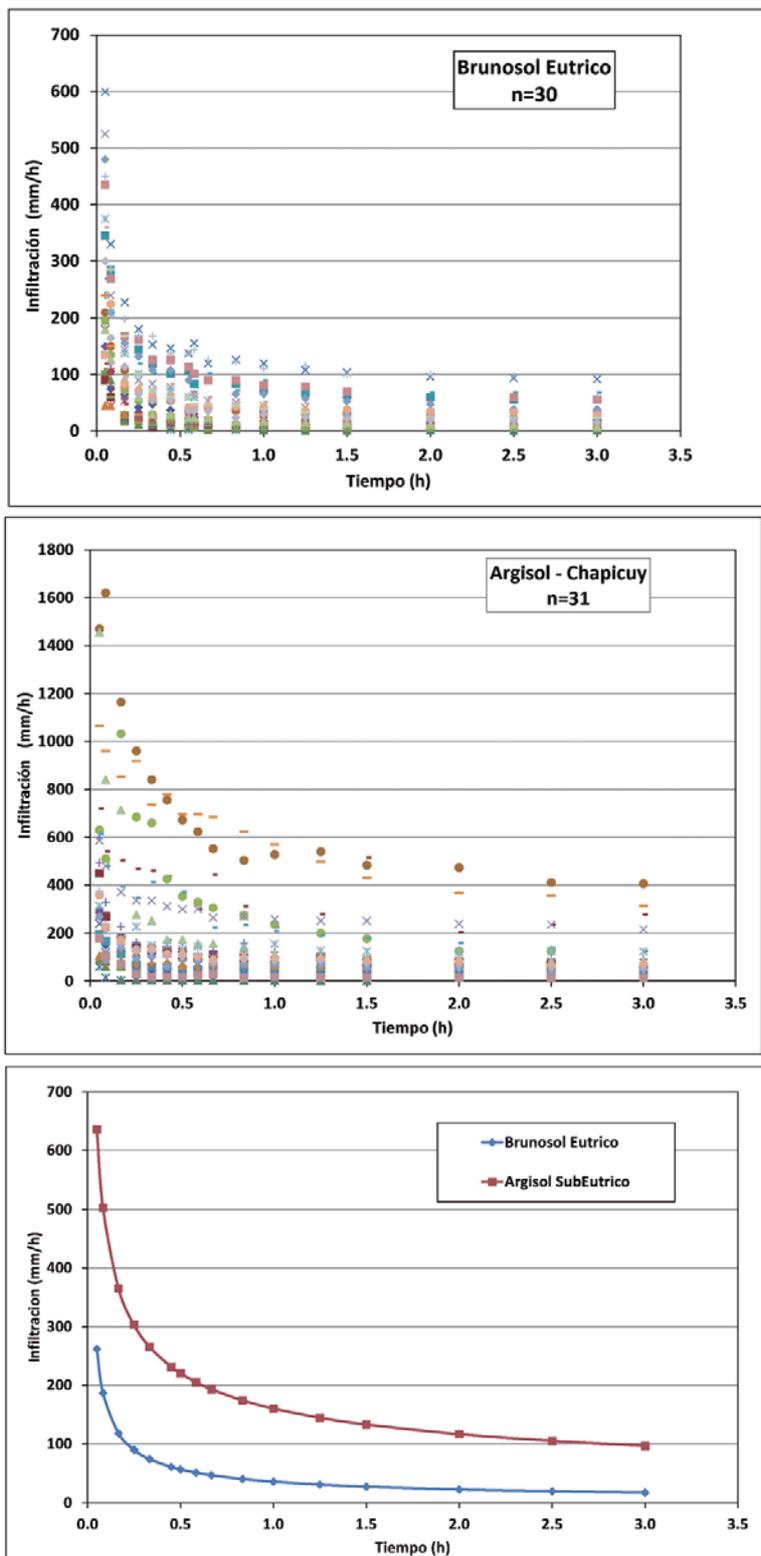


Figura 14. Velocidad de Infiltración (mm h^{-1}) de dos suelos en el área de Chapicuy (Salto). a y b: medidas individuales obtenidas de los $n = 30$ y 31 muestreos realizados en cada suelo respectivamente; c: curvas de velocidad de infiltración promedio generados a partir de las medidas individuales. Método del doble anillo.

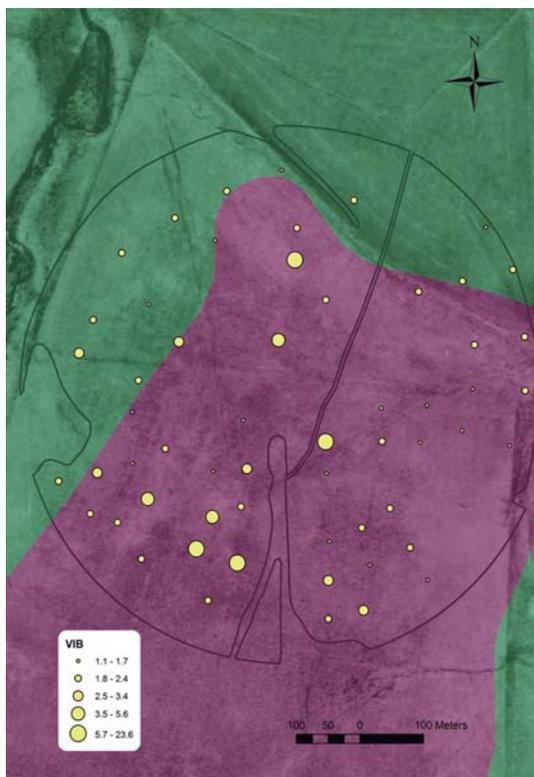


Figura 15. Distribución espacial de la velocidad de infiltración básica (VIB, mm h^{-1}) dentro del círculo de un pivote de 60 ha. Salto. 2015. Método del doble anillo. Área de color verde: suelo del grupo Coneat; área de color violeta: suelo del grupo Coneat.

La capacidad de almacenaje promedio de los suelos de Uruguay está dentro de 110 a 130 mm en el perfil, si sumamos el horizonte A y el B (Anexo 1). En el momento de diseñar el sistema de riego para una operación o chacra en particular, la estimación de la disponibilidad de agua en el suelo se realiza frecuentemente con valores promedio similares, sobreestimando muchas veces la disponibilidad real de agua en el suelo; por ejemplo en pasturas y cultivos herbáceos. Por otro lado, al realizar un correcto balance hídrico del suelo, tenemos que considerar la profundidad de arraigamiento efectiva del cultivo a los efectos de determinar la profundidad de la lámina de riego, pero no siempre se corresponde con su máxima profundidad radicular que puede alcanzar el mismo. La mayor densidad radicular se desarrollará en el perfil del suelo donde se aplique el agua y los nutrientes. No es correcto pensar que si un cultivo-pastura puede extraer agua hasta 80 cm cuando se dan condiciones de sequo, ésta deba de ser la correcta profundidad a regar en condiciones de riego.

El contenido de agua en los primeros 10 cm el suelo suelen ser de alta importancia durante la instalación de cultivos-pasturas invernales al comienzo del otoño, donde muchas pérdidas se han constatado por falta o excesos de agua en esta época y etapa

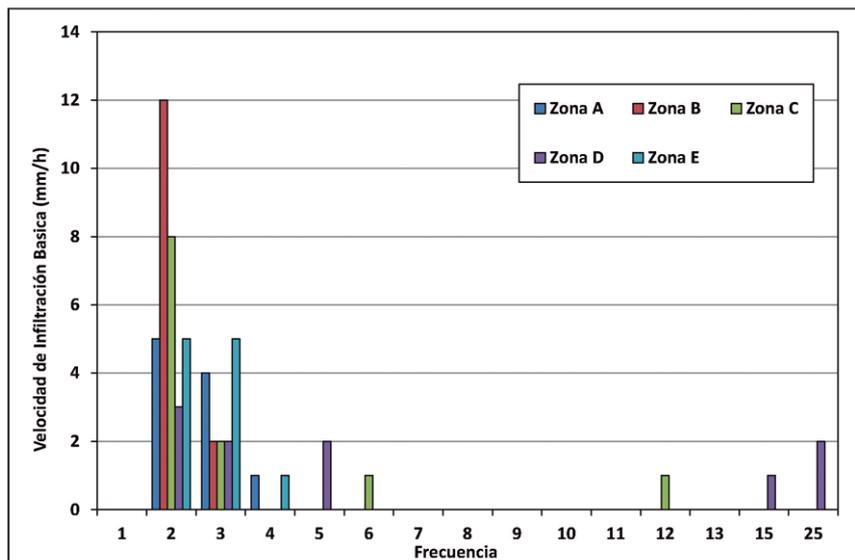


Figura 16. Distribución de frecuencias de la velocidad de infiltración básica (mm h^{-1}) en cinco zonas diferentes dentro del círculo de un pivote de 60 ha. Salto. 2015. Método del doble anillo.

fenológica, aunque a los 30 cm de profundidad la cantidad de agua presente sería apropiada para el crecimiento de la planta.

Teniendo en consideración el régimen pluviométrico y la demanda atmosférica de Uruguay, en el ámbito de nuestros suelos, podemos constatar períodos de profundo déficit hídrico en el suelo, con intervalos variables entre los años, pero que potencialmente se presentan durante el **período fenológico crítico** de muchos cultivos y pasturas, que ocasionan reducciones del rendimiento o en la calidad de los mismos.

2. ESTRATEGIAS EN LA PLANIFICACIÓN DEL RIEGO A TRAVÉS DEL MODELO DE BHS

La planificación correcta del riego para un determinado cultivo y sistema de riego permite en la mayoría de los casos: a) un mejor aprovechamiento del agua de riego y de la lluvia, y b) minimizar el uso de energía del sistema de riego, que para las condiciones de Uruguay, es un costo relativamente importante. En Uruguay, y hasta la fecha, el agua de riego que introducimos en las chacras no se paga ni por volumen utilizado, ni por canon de concesión de las aguas públicas; simplemente, el permiso de uso para riego de aguas públicas se gestiona frente a las autoridades pertinentes (DINAGUA-MVOTMA). De acuerdo a las disponibilidades de agua del sitio en particular, la autoridad pertinente es quien otorga el permiso a través de un caudal ficto máximo. En este sentido, la responsabilidad colectiva ambiental nos llevaría también a ser cada día más eficientes en el uso del agua de riego dentro de los cultivos, quizás con especial énfasis en aquellos que por su método de riego y cantidad de superficie plantada sean grandes consumidores de agua para riego. El desarrollo del riego en Uruguay se ha enfocado muchas veces en ser eficaces, es decir, lograr incrementar los rendimientos con volúmenes de agua de riego cada vez más importantes, pero esto no significa que sean más eficientes en el uso del agua. Sin embargo, dado el actual y futuro escenario respecto al cambio climático, la intensificación

agropecuaria, el incremento de costos energéticos y la responsabilidad social frente al mantenimiento de la sostenibilidad ambiental, entre otros aspectos, es necesario que exista un trabajo focalizado en el incremento de la eficiencia en el uso del agua de riego (kg del producto comercial por mm de agua de riego aplicado), pero sin perder de vista incrementar el rendimiento y calidad de los cultivos y pasturas.

En zonas templadas como Uruguay donde es muy alta la variabilidad de la pluviometría entre años, para un determinado mes o semana (Figura 11), la planificación del riego juega un papel muy importante a los efectos de poder aprovechar al máximo el agua de lluvia. De esta forma se puede aumentar la precipitación natural que efectivamente se emplea en el consumo del cultivo, minimizando las pérdidas por percolación profunda y de escorrentía superficial.

En este sentido, bajo una visión amplia, y sin tener en cuenta los métodos de riego de arroz en el mundo; muchos de los desarrollos e innovaciones en los sistemas de riego actualmente disponibles han sido desarrollados en países donde es muy escasa la precipitación durante todo el desarrollo del cultivo, con suelos de buena infiltración y con costos de energía inferiores a los de Uruguay. Esto se aprecia por el desarrollo y oferta de sistemas de riego de alta frecuencia y relativamente de bajos caudales, donde, en la mayoría de los casos, es más importante el diseño inicial del mismo que las posibles adaptaciones del equipo a los cambios en la planificación del riego entre años. Por otro lado, los sistemas de riego por superficie, que en general aportan mayores láminas de riego, tienen mayores posibilidades de ser adaptados a las condiciones variables de precipitación que ocurren en Uruguay, pero con el inconveniente de que presentan una menor capacidad de automatización del sistema y mayor uso de mano de obra a nivel predial.

Para poner de manifiesto la importancia que tiene el adecuado uso y manejo del agua de riego, en este apartado se plantean -a modo de ejemplo- tres estrategias diferentes en la planificación del riego, bajo distin-

tas condiciones de cultivo y sistemas de riego. Estas tres estrategias fueron simuladas mediante el modelo WinISAREG. Para este ejemplo, se utilizó un cultivo de maíz de estación, en un suelo Brunosol Subéutrico Típico (Coneat 10.6) cercano a la Estación Experimental «Wilson Ferreira Aldunate» INIA Las Brujas, durante dos ciclos de cultivo, un ciclo relativamente seco (1999-2000) y otro relativamente lluvioso (2000-2001).

Estrategia 1: Comprende a aquellos métodos de riego como: aspersión o riego por superficie, en los cuales podemos ajustar de un riego a otro, la lámina bruta a aplicar, dentro del diseño original del equipo; pudiendo aplicar láminas relativamente pequeñas (10-15 mm) o mayores (35-40 mm) ya sea cambiando el tiempo de riego (aspersión) o el caudal del mismo (riego por superficie). En estos casos se permite el agotamiento del agua en el suelo hasta un valor (P) del contenido de agua disponible del suelo, umbral que no provoca estrés o reducción del rendimiento y siempre que se riega se busca llegar a capacidad de campo con la lámina de reposición.

En la figura 17 se puede apreciar la evolución del contenido de agua del suelo en un cultivo de maíz de ciclo medio bajo riego, donde la lámina de reposición siempre llega a capacidad de campo luego de cada riego, mientras que otras veces se completa por las precipitaciones ocurridas. Con esta planificación del riego se realizaron 14 riegos durante todo el período, con láminas entre 27.6 y 52.7 mm; con un volumen total de agua aplicada de 501 mm (Cuadro 3).

Estrategia 2: Esta estrategia está basada en sistemas de alta frecuencia de riego, como son el riego localizado y los sistemas de riego autopropulsados (pivote central y lateral de avance frontal). El correcto uso de estos sistemas de riego y especialmente en países donde las precipitaciones durante el desarrollo del cultivo son muy bajas o nulas, sugiere una alta frecuencia de riego, habitualmente con riegos diarios y con láminas en el entorno de 8 a 12 mm diarios. Es aquí donde se plantean dos alternativas en la programación del riego: a) **la estrategia 2**, con un enfoque donde se considera una frecuen-

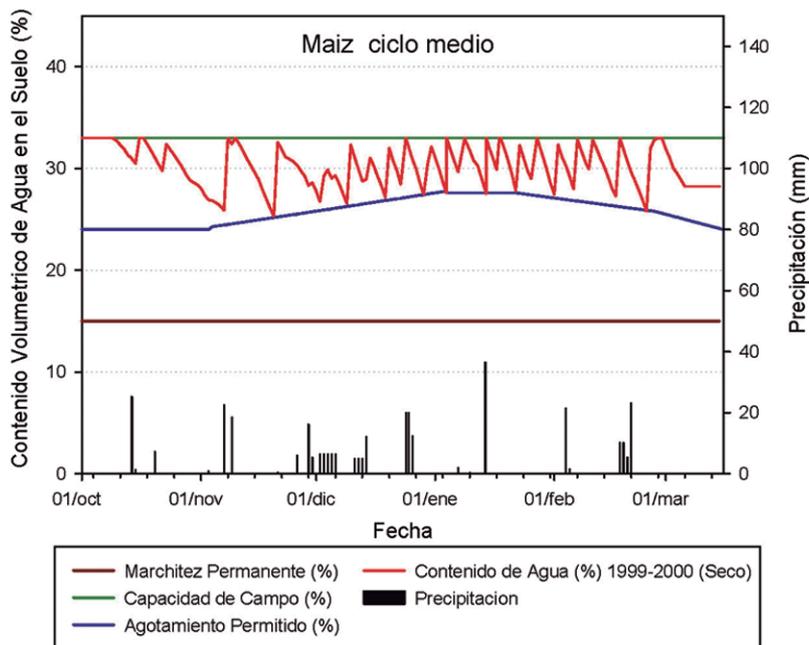


Figura 17. Balance hídrico del suelo para un cultivo de maíz de ciclo medio en un suelo Brunosol Subéutrico Típico (Coneat 10.6) en el área de influencia de INIA Las Brujas durante la temporada 1999-2000.

Cuadro 3. Número de riegos y láminas brutas de riego a aplicar (mm) con el escenario 1 de planificación durante el ciclo 1999-2000.

Fecha de riego	Número de riego	Lámina de riego, mm
21/11/1999	1	27,6
10/12/1999	2	31,7
20/12/1999	3	32,5
25/12/1999	4	32,8
03/01/2000	5	32,9
08/01/2000	6	32,4
14/01/2000	7	32,9
22/01/2000	8	32,9
27/01/2000	9	34,7
01/02/2000	10	36,1
06/02/2000	11	37,6
17/02/2000	12	41,1
24/02/2000	13	43,1
13/03/2000	14	52,7

cia moderada de precipitaciones durante el desarrollo del cultivo; y b) **la estrategia 3**, oportuna para situaciones de baja a muy baja frecuencia de precipitaciones.

El planteamiento de la estrategia 2 permite el agotamiento del agua en el suelo, dentro de la profundidad de máxima absorción radicular (profundidad efectiva), hasta un umbral o nivel crítico de agotamiento permisible del agua (umbral=P). Por debajo de dicho umbral el agua limita y disminuye algunas de las funciones fisiológicas de la planta. La lámina bruta a aplicar es definida de tal forma que el contenido de agua del suelo esté siempre con valores superiores al nivel de agotamiento permisible seleccionado, dicho en otras palabras, que el contenido de agua del suelo sea fácilmente disponible para la planta.

La planificación del riego mostrada en la figura 18 fue prevista con láminas de 10 mm. El contenido de agua del suelo se mantiene siempre entre capacidad de campo y el umbral de riego (P). Con esta estrategia se mantiene siempre el contenido de agua en el suelo por encima del umbral (P) donde no hay reducción en las funciones fisiológicas, pero con suficiente espacio de recarga de agua en el

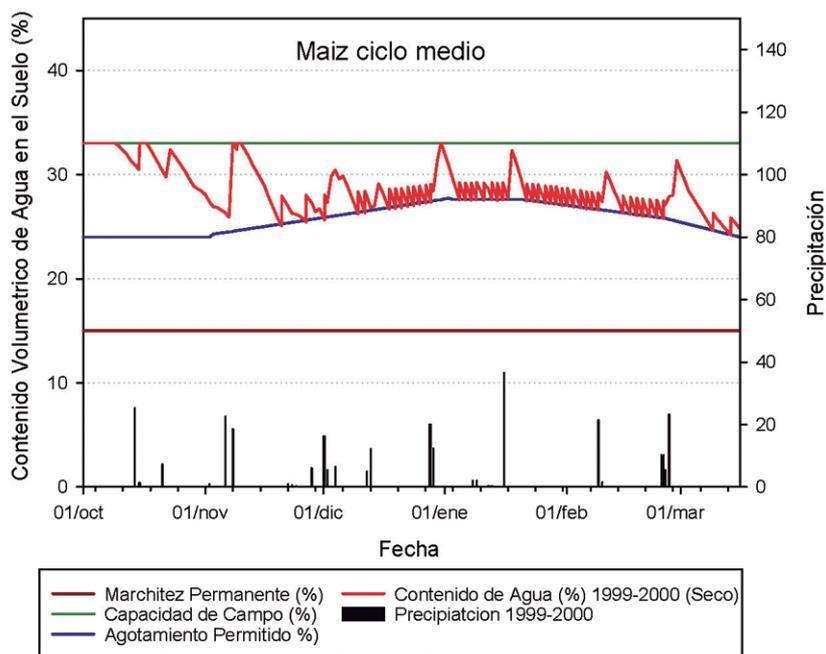


Figura 18. Balance hídrico del suelo para un cultivo de maíz de ciclo medio en un suelo Brunosol Subéutrico Típico (Coneat 10.6) en el área de influencia de INIA Las Brujas durante la temporada 1999-2000. Alta frecuencia de riego, láminas de 10 mm hasta agotamiento permitido (P).

suelo para aprovechar más la penetración del agua de lluvia dentro del perfil. Con esta estrategia se realizaron 43 riegos con una lámina de agua aplicada durante todo el ciclo productivo de 430 mm, bajo las mismas condiciones ambientales y de cultivo que el escenario 1.

Estrategia 3: Esta estrategia es la segunda variante de la estrategia 2. Está pensada para riegos de alta frecuencia, con láminas pequeñas de 10 mm y con frecuencia de aplicación diaria. De esta forma se permite el agotamiento del agua del suelo de solo 10 mm, lo que equivale a la cantidad de agua de la lámina de reposición (asumiendo para este ejemplo 100% de eficiencia). Este tipo de planificación del riego es muy utilizado en países donde la mayor parte del agua que consume el cultivo tiene por origen el riego, en condiciones de muy baja precipitación; es así que la lámina bruta es prácticamente el consumo diario de la planta y la eficiencia de aplicación del sistema. Es muy frecuente ver este desarrollo en cultivos hortícolas y frutícolas; así como en sistemas de pivot en zonas áridas o semiáridas. Al mismo tiempo, en cultivos horti-frutícolas se adiciona el fertirriego, ya sea por pulsos o con fertirriego continuo.

En la figura 19 se puede apreciar que la planificación del riego fue prevista con aplicaciones casi diarias de láminas de 10 mm, permitiendo el agotamiento del agua en el suelo de solo 10 mm, equivalente a la lámina bruta aplicada por el sistema de riego (considerándose 100% de eficiencia). Esta estrategia lleva a tener siempre altos contenidos de agua fácilmente disponible por la planta, desde capacidad de campo hasta un umbral de agotamiento, el cual corresponde con la lámina neta de reposición. En este ejemplo en particular se hicieron 69 riegos, en las mismas condiciones meteorológicas y de cultivo que el escenario 1 y 2. El total de agua aplicada con el riego fue de 688 mm durante todo el ciclo productivo.

Esta práctica de riego desaprovecha mucho más la precipitación natural durante el desarrollo del cultivo, ocasionando que el agua de lluvia que no es infiltrada al suelo se pierda por escurrimiento superficial. Por tanto, se puede afirmar que se trata de una práctica poco recomendable para las condiciones climáticas (intensidad y frecuencia de precipitación) de Uruguay.

Las tres estrategias llevadas a cabo para el mismo cultivo (maíz de ciclo medio) y den-

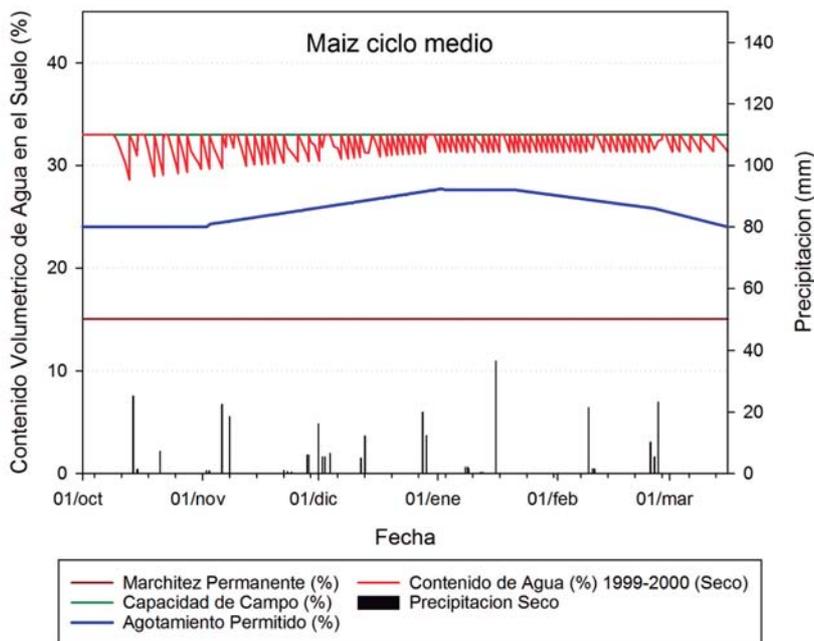


Figura 19. Balance hídrico del suelo para un cultivo de maíz de ciclo medio en un suelo Brunosol Subéutrico Típico (Coneat 10.6) en el área de influencia de INIA Las Brujas durante el ciclo 1999-2000. Alta frecuencia de riego, láminas de 10 mm.

tro de las mismas condiciones climáticas, permite ver como la programación del riego tiene una incidencia importante en la frecuencia o número de riegos y, sin lugar a dudas, en la cantidad de agua utilizada en el riego. Como consecuencia, se puede determinar los posibles ahorros de energía, así como mejorar la eficiencia de utilización del agua de lluvia.

Para un año relativamente seco como es el mostrado en el ejemplo anterior: ciclo productivo 1999-2000 (265 mm durante el ciclo), se destacan diferencias importantes en el número de riegos y en la lámina de agua a aplicar al cultivo (Figura 20; Cuadro 4). La estrategia 3 utilizó 1,6 veces más agua y número de riegos que la estrategia 2 (Cuadro 4). Por otro lado, manejar el sistema de

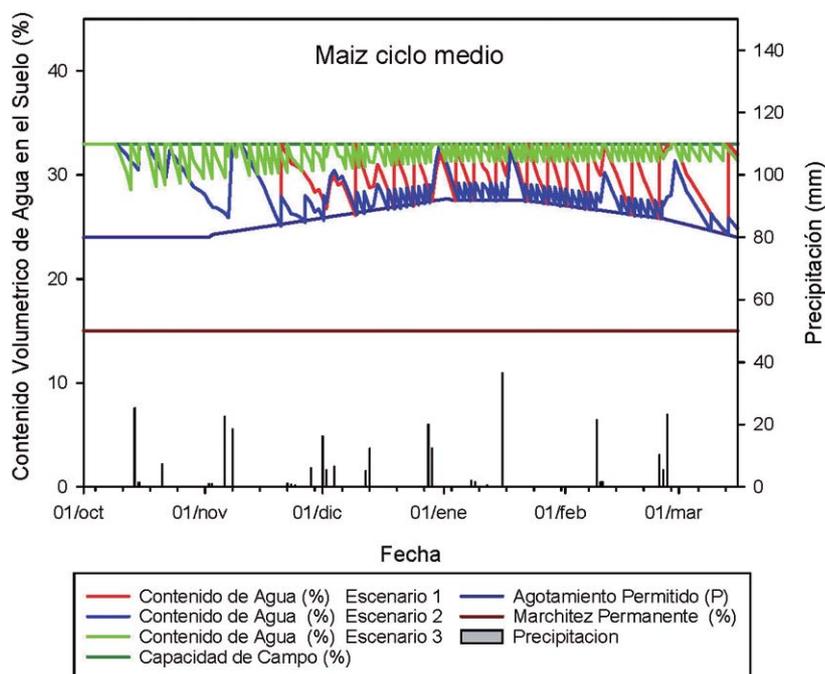


Figura 20. Comparación de tres estrategias de programación del riego en la evolución del contenido de agua en el suelo para un cultivo de maíz de ciclo medio en un suelo Brunosol Subéutrico Típico (Coneat 10.6) en el área de influencia de INIA Las Brujas durante la temporada 1999-2000 (baja pluviometría).

Cuadro 4. Comparación de las tres estrategias de riego, durante el ciclo 1999-2000. Temporada de baja pluviometría.

	Número de riegos	Volumen total de riego mm	Lámina promedio mm	Precipitación mm
Escenario 1 Agotamiento hasta umbral (P) y reposición hasta Capacidad de Campo	14	501	38	265
Escenario 2 Alta frecuencia con umbral (P) variable, lámina fija 10 mm	43	430	10	265
Escenario 3 Alta frecuencia con umbral equivalente a la lámina de reposición (10 mm)	69	688	10	265

riego en el límite inferior del agua fácilmente disponible (umbral P) para aprovechar al máximo la precipitación natural implica un muy buen manejo de todo el sistema de riego y un control muy preciso del mismo; además de tener un diseño flexible que permita regularlo fácilmente.

En contraste, durante los años más lluviosos como en el ciclo 2000-2001 (496 mm

en el ciclo), la diferencia entre los dos escenarios 2 y 3 es mayor que en los años secos, en el número de riegos y en volumen de agua de riego (Figura 21; Cuadro 5). La estrategia 3 utilizó 2,4 veces más agua que la estrategia 2 (543 mm vs 230 mm), evidenciando que con una correcta planificación del riego se puede hacer un ahorro importante de agua y energía.

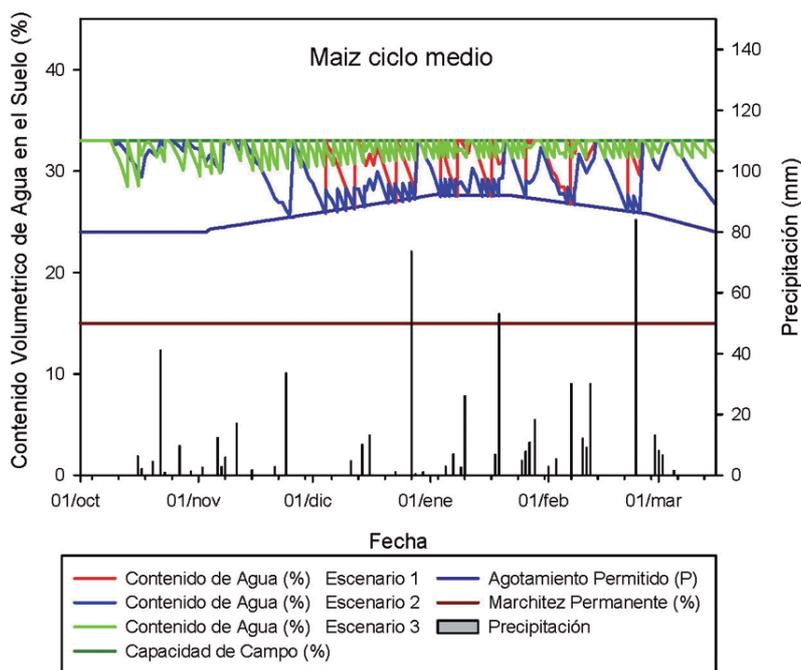


Figura 21. Comparación de tres estrategias de programación del riego en la evolución del contenido de agua en el suelo para un cultivo de maíz de ciclo medio en un suelo Brunosol Subéutrico Típico (Coneat 10.6) en el área de influencia de INIA Las Brujas durante la temporada 2000-2001 (alta pluviometría).

Cuadro 5. Comparación de las tres estrategias de riego, durante el ciclo 2000-2001. Temporada de alta pluviometría.

	Número de riegos	Volumen total de riego mm	Lámina promedio mm	Precipitación mm
Escenario 1 Agotamiento hasta umbral (P) y reposición hasta Capacidad de campo	9	307	34	496
Escenario 2 Alta frecuencia con umbral (P) variable, lámina fija 10 mm	23	230	10	496
Escenario 3 Alta frecuencia con umbral equivalente a la lámina de reposición (10 mm)	54	543	10	496

3. RESUMEN

- Los modelos de balance hídrico del suelo, permiten no solo evaluar la evolución del riego en un determinado ciclo, sino que también optimizar diferentes estrategias en la programación del riego.
- Si bien es imprescindible tener un preciso diseño del sistema de riego; también es esencial una correcta planificación y programación del riego.
- La correcta programación del riego ayuda a lograr mejores rendimientos físicos, teniendo en cuenta, las condiciones variables del clima, la eficiencia de uso del agua, el costo energético y la minimización del deterioro ambiental (principalmente erosión y uso responsable del agua).
- La mejor programación del riego debe contemplar el mejor aprovechamiento de la pluviometría natural de las diferentes regiones de Uruguay. En años relativamente con mayor precipitación, la programación del riego a través del balance hídrico llevará a un mejor uso del agua y de la energía.



Foto 4. Descargas de las mangas de riego por superficie en pasturas.

CAPÍTULO 3. ESTIMACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DE AGUA PARA RIEGO EN CULTIVOS Y PASTURAS

Álvaro Otero*
Claudio García**

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de agua que requiere un cultivo para maximizar su rendimiento y calidad son un elemento clave en el diseño y en la planificación de un correcto sistema de riego. En general, son las necesidades hídricas del cultivo en el período crítico, junto al agua fácilmente utilizable por el cultivo, los datos mínimos que se requieren para el adecuado dimensionamiento de los sistemas de riego (cálculos de caudal y tiempos de riego). En este sentido, el objetivo que se propone en este capítulo es de estimar los requerimientos de riego de algunos cultivos que se desarrollan bajo diferentes suelos y zonas agrícolas de Uruguay. Para ello, se procedió a realizar las correspondientes simulaciones bajo dos escenarios: a) la estimación básica de las necesidades de agua del cultivo; b) la estimación de las necesidades de agua de riego, teniendo en cuenta diferentes estrategias de planificación del riego.

A tal efecto se estimaron las necesidades de agua para riego en varios cultivos a

través de la modelación del balance hídrico del suelo durante 25 años en diferentes suelos del país, principalmente en cuatro zonas geográficas: Salto, Colonia, Canelones y Treinta y Tres. Para la modelación del balance hídrico del suelo y, en definitiva, para la estimación de las necesidades de riego se utilizó el modelo WinIsareg 1.3 (Pereira et al., 2003).

Datos Climáticos. Para confeccionar la base de datos meteorológicos usada en el modelo, se incorporaron los datos climáticos de las estaciones agrometeorológicas de INIA (INIA-GRAS, 2015) (Cuadro 6). Los registros diarios fueron del período comprendido entre 1 de julio de 1989 al 31 de junio de 2015. Para la base de datos se utilizaron los registros de la temperatura máxima y mínima del aire, la humedad media y mínima del aire, el número de horas de insolación, radiación solar (Rs), la precipitación efectiva y la velocidad del viento a 2 m de altura. Para estimar la precipitación efectiva se utilizó el índice de precipitación antecedente (Shaw 1994). La estimación de la eva-

Cuadro 6. Localización de las Estaciones Agrometeorológicas INIA.

Estación agrometeorológica	Ubicación		Altitud (m.s.n.m)
INIA-Salto Grande	31°16' Sur	57°53' Oeste	50
INIA-La Estanzuela	34°20' Sur	57°41' Oeste	81
INIA-Las Brujas	34°40' Sur	56°20' Oeste	32
INIA-Treinta y Tres	33°14' Sur	54°15' Oeste	100

Fuente: INIA-GRAS, 2015. <http://www.inia.org.uy/online/site/gras.php>.

* Ing. Agr., MSc. Programa de Investigación en Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA Salto Grande.

** Ing. Agr., Dr. Programa de Investigación en Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA Las Brujas.



Foto 5. Monitoreo permanente del contenido de agua en el suelo en el cultivo de soja.

potranspiración diaria de referencia (ET_o, PM-56) fue calculada con el software REF-ET v 4.1 (Allen, 1990) con los registros originales de cada estación de INIA.

Parámetros de los Suelos. Se seleccionaron 3 grupos CONEAT de suelos representativos de cada región (CONEAT, 1979), dentro de cada grupo CONEAT se utiliza-

Cuadro 7. Principales grupos Coneat y suelos dominantes (perfil) utilizados en la modelación (Molfino y Califra, 2001).

Salto		Treinta y Tres		Colonia		Canelones	
Grupo CONEAT	Perfil	Grupo CONEAT	Perfil	Grupo CONEAT	Perfil	Grupo CONEAT	Perfil
9.6	USDA 4	2.21	F23-01	10.3	M25-05	10.6a	L28-03
12.11	USDA 5	4.1	D20-54	10.8b	USDA 1	10.8a	J27-12
S10.21	O05-03	10.7	F29-20	11.7	USDA 15	11.1	P20-02

Cuadro 8. Cultivos seleccionados por región de producción.

Salto	Treinta y Tres	Colonia	Canelones
Alfalfa	Alfalfa	Alfalfa	Alfalfa
Festuca	Festuca	Festuca	Festuca
Maíz Ciclo Medio	Maíz Ciclo Medio	Maíz Ciclo Corto	Maíz Ciclo Medio
Soja GM 4	Soja GM 5-6	Maíz Ciclo Medio	Soja GM 5-6
Soja GM 5-6		Soja GM 4	Durazno Temprano
Soja GM 7-8		Soja GM 5-6	Durazno Estación
Cítricos Navel		Soja GM 7-8	Manzano
			Pera
			Cítricos Navel

ron los datos de caracterización edafológica del perfil del suelo dominante en cada grupo (Molfino y Califra, 2001). Utilizando el porcentaje de arena, limo, arcilla y materia orgánica de cada horizonte y perfil se estimó la densidad aparente (D_a) de cada horizonte, así como el contenido volumétrico de agua a capacidad de campo y en el punto de marchitez permanente (Silva et al., 1988) (Anexo 1 y Cuadro 7).

Características de los Cultivos. Se seleccionaron diferentes cultivos para las distintas regiones de producción (Cuadro 8). Para cada cultivo se determinaron las fechas promedio de su siembra, cosecha y fenología, así como la profundidad promedio efectiva de riego en cada etapa fenológica y el umbral de agotamiento de agua permitido (P) en el suelo (Anexo 2). Los valores de K_c fueron tomados de la Guía FAO-56 (Allen et al., 1998), cuando no se tenían valores locales de K_c (García Petillo y Castel, 2007).

Parámetros de riego en el modelo. Los parámetros de riego son esenciales para poder diferenciar los distintos escenarios y programaciones de riego. Estos parámetros van a tener que ser ajustados de acuerdo a los objetivos productivos buscados; es así que, en este caso, se seleccionaron inicialmente dos objetivos complementarios. Primero, la estimación básica de los requerimientos de agua para riego del cultivo, calculada directamente a través del modelo. Segundo, la estimación del requerimiento de agua para riego, teniendo en cuenta diferentes estrategias de planificación del riego de acuerdo al tipo cultivo y al sistema de riego empleado, procurando maximizar el uso del agua de lluvia. En ambos objetivos, se estimaron las necesidades totales de agua para riego ($\text{mm ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) y su caudal máximo (Q , $\text{l s}^{-1} \text{ha}^{-1}$; estimada a partir de las necesidades hídricas del cultivo en el período pico en cada combinación de región de producción, cultivo y tipo de suelo dominante).

Dentro del segundo objetivo, se tuvo en cuenta tres estrategias de planificación del riego:

- *Estrategia 1:* Se modela un régimen de riego en el cual se permite el agotamiento del agua en el suelo hasta el umbral del contenido de agua en el suelo (P) y con una lámina de reposición hasta llegar a capacidad de campo cada vez que se riega.
- *Estrategia 2:* Se modela un régimen de riego donde también se permite el agotamiento del agua en el suelo hasta el umbral P, pero con una lamina de reposición fija de 10 mm en cada riego realizado. El propósito de esta estrategia de riego es simular las condiciones de riego de alta frecuencia, habitualmente encontradas en los riegos por goteo o pivot, donde se permite el agotamiento del suelo hasta el umbral preestablecido (P).
- *Estrategia 3:* Se modela un régimen de riego de alta frecuencia con la aplicación de una lámina de riego de 10 mm, similar al anterior. En esta estrategia se estimó un umbral de agotamiento del suelo (P) equivalente a un agotamiento del suelo de 10 mm, igual a la lámina de reposición. Este nuevo valor de P (%) debió ser estimado para cada suelo y para cada cultivo (profundidad del sistema radicular, fenología). El propósito de esta estrategia es simular aplicaciones de alta frecuencia (10 mm) al igual que el escenario 2, programando un riego casi diario; reponiendo cantidades de agua muy pequeñas todos los días, semejando las condiciones de riego en climas con nula o muy escasa precipitación.

En los dos escenarios planteados y en las tres estrategias de riego modeladas se realizaron supuestos importantes para la estimación del agua requerida para regar. Estos supuestos no siempre se van a cumplir en todas las situaciones, especialmente en lo referente a la eficiencia de riego, que depende del tipo y diseño del sistema de riego empleado, y también de su mantenimiento y operación.

Supuestos a poner en el modelo (WinISAREG): a) la eficiencia de uso del agua por el sistema es del 100 %; b) es nula (0 %) la percolación de agua hacia horizon-

tes más profundos que la profundidad de riego preestablecida, basados en la mayoría de los perfiles de nuestros suelos, con horizontes B de muy baja permeabilidad (Duran et al., 2007); c) no hay restricciones en el desarrollo del cultivo por la calidad del agua de riego, donde existen pocas situaciones a nivel nacional con problemas reales para el uso del agua para riego (Zamalvide, 2001); d) para el cálculo del caudal requerido por sistema de riego se tuvo en cuenta que la jornada máxima efectiva de riego es de 8 horas.

Criterio de selección del requerimiento de agua para riego. Las simulaciones realizadas con el modelo WinISAREG en los 25 años considerados permitieron determinar cuál es la cantidad total de agua de riego ($\text{mm ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) y el caudal máximo requerido ($\text{l s}^{-1} \text{ha}^{-1}$) en cada uno de los ciclos anuales de los cultivos. Como referencia general, para determinar la cantidad de agua de riego necesaria para cada cultivo, se optó por el valor de la misma que sea suficiente en el 80 % de los años bajo riego; manteniendo un 20 % de los años en donde la necesidad de agua para riego sobre pasa la cantidad disponible.

2. ESTIMACIÓN BÁSICA DE LOS REQUERIMIENTOS DE AGUA PARA RIEGO DEL CULTIVO O PASTURA

La necesidad de agua para riego entre años de un cultivo o pastura, va a depender no solo de la evapotranspiración y de la eficiencia de uso de la precipitación, sino también del almacenaje potencial de agua en el suelo y de las condiciones de crecimiento y desarrollo del cultivo. Estos aspectos fueron vistos también en el capítulo sobre la optimización de la programación el riego.

La ocurrencia e intensidad de la precipitación, en la climatología de Uruguay, es uno de los factores más importantes en la planificación del riego y, como se presentó anteriormente, con una alta variabilidad entre años.

De acuerdo a la ocurrencia e intensidad de la precipitación registrada durante el período de años de estudio, el requerimiento de agua para riego va a ser diferente según la zona de siembra del cultivo. Como ejemplo, un cultivo de soja con grupo de madurez entre 5 y 6, presenta diferentes requerimientos de agua para riego si es sembrada en Salto, en Colonia o Treinta y Tres. Para el período de 25 años, comprendidos entre 1989 y 2015, y con un requerimiento de agua para riego que contemple el 80 % de los años (20 años en 25), en la región de Salto se necesitarían entre 389 y 422 mm, para Colonia se necesitarían entre 389 y 407 mm, y para Treinta y Tres entre 347 y 361 mm (Figura 22).

Dentro de los grupos de suelos seleccionados, si bien existe una pequeña diferencia en las láminas de riego requeridas, ésta diferencia no parece ser muy importante en base anual, tomando todo el período de crecimiento. Es de notar que no se muestran suelos muy contrastantes entre sí, sino los más frecuentes; esto podría llevar a resultados diferentes si se tienen en cuenta suelos cultivables pero con mayores limitaciones; principalmente en la capacidad exploratoria de las raíces o la propia textura de sus horizontes. Es frecuente en suelos agrícolas de Uruguay encontrar manchones o áreas relativamente importantes con limitantes texturales y/o químicas importantes, que al limitar el crecimiento del cultivo van a cambiar sus necesidades de riego potencial.

Siguiendo el mismo ejemplo al indicado anteriormente, los requerimientos estimados de agua de riego para diferentes grupos de madurez de soja, no difieren mucho entre sí, con valores de 403 a 416 mm en los grupos de madurez 4; entre 417 y 429 mm en los grupos 5 y 6 y entre 409 y 421 mm para los grupos de madurez 7 y 8 (Fig. 23). En este caso, dentro de los grupos de madurez de soja no se han estimado diferencias importantes en los diferentes suelos.

En el cuadro 10 podemos ver los requerimientos básicos estimados de riego anual (mm) para diferentes sitios de producción, suelos y cultivos. Estos valores

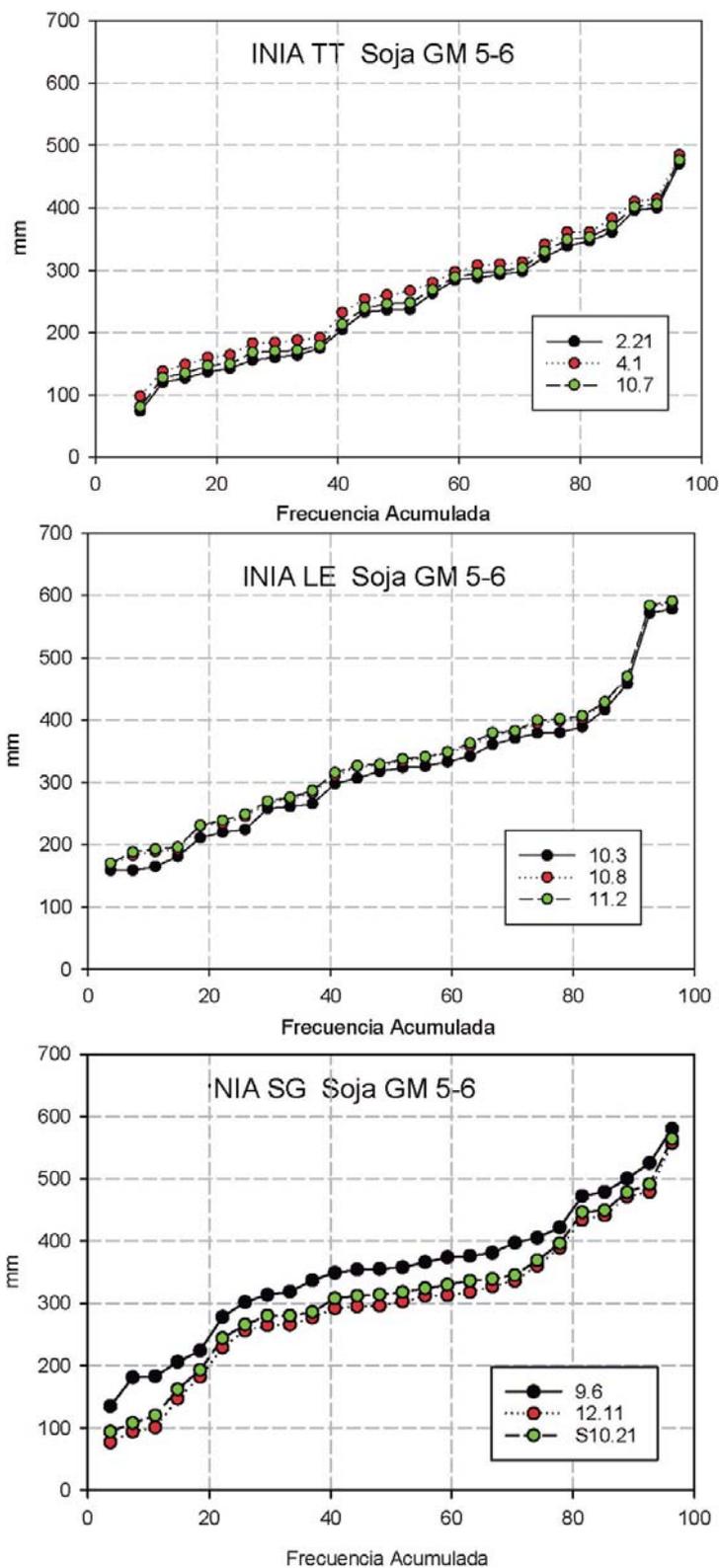


Figura 22. Lámina de riego requerida por el cultivo de soja (grupos de madurez 5 y 6) bajo tres tipos de suelos mostrada según la frecuencia acumulada en el período total de años simulados. Período 1989-2015.

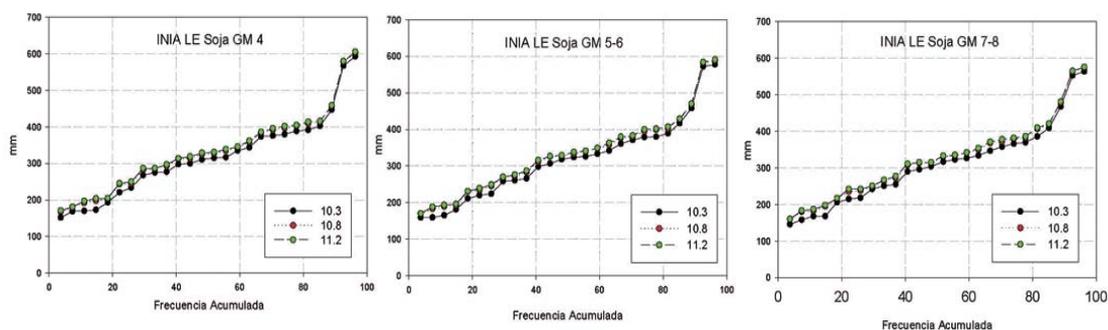


Figura 23. Requerimiento de agua de riego (mm) en Soja grupos de madurez 4; 5 - 6 y 7 - 8; en diferentes suelos. INIA La Estanzuela. Frecuencia acumulada. Período 1989-2015.

Cuadro 9. Eficiencias de aplicación indicativas de diferentes métodos de riego. Adaptado de Brouwer et al. (1989).

Método de riego	Eficiencia de aplicación
Riego por superficie (surcos, melga, inundación)	50-60 %
Riego por aspersión. Fija, cañón, lateral de avance frontal	75 %
Riego por aspersión. Pivot	80-85 %
Riego por goteo	90 %
Riego por microaspersión	90-80 %

deben de ser corregidos por la eficiencia de aplicación de agua de acuerdo al método de riego que utilizemos, ya sea la eficiencia global de los sistemas tipo, o el propio de cada sitio si este se llega a conocer. Valores indicativos de la eficiencia global de aplicación en campo en los distintos sistemas o métodos de riego se pueden apreciar en el cuadro 9.

Los caudales pico ($l\ s^{-1}\ ha^{-1}$) representan el máximo caudal puntual que necesitamos dentro del ciclo del cultivo, con el cual se satisfacen las demandas de riego en ese momento. En este sentido, el modelo Winlsareg, cuando simula varios ciclos consecutivos, determina un valor máximo anual. En el cuadro 11 se muestran los valores del caudal pico que debería tener el sistema para el 80 % de los años de estudio (20 años de los 25 años de riego analizados).

Podemos encontrar muy pocas diferencias entre el máximo caudal necesario para diferentes suelos. Estas diferencias comienzan a hacerse más importantes entre los distintos sitios de cultivo y cla-

ramente entre cultivos (Cuadro 11). De acuerdo al sistema de riego que se esté empleando se deberán ajustar estos valores, teniendo en cuenta la eficiencia global del sistema (Cuadro 9). Los valores de eficiencia global de los sistemas no son fijos en cada sistema de riego, son orientativos, y de allí que conviene determinar a campo esta eficiencia, con datos reales para cada situación productiva en particular. Por ejemplo en sistemas con riego por superficie se deberá ajustar este valor con una eficiencia del 50 %; en sistemas de alta frecuencia (localizado y pivot) con una eficiencia del 85%; mientras que para sistemas de aspersión convencional (cañón, lateral de avance frontal, aspersión fija y portátil) se deberá utilizar una eficiencia del 70 %. De tal forma que un maíz de ciclo medio en Salto, tendrá un caudal pico de $0,98\ l\ s^{-1}\ ha^{-1}$, considerando una eficiencia del 100 %, si lo regamos con un sistema superficial este caudal pico debería ser de $1,96\ l\ s^{-1}\ ha^{-1}$, $1,2\ l\ s^{-1}\ ha^{-1}$ en un sistema de alta frecuencia (pivot) o $1,4\ l\ s^{-1}\ ha^{-1}$ en un sistema de aspersión clásico.

Cuadro 10. Requerimiento estimado de agua para riego (mm) en diferentes sitios de producción y cultivos.

	CONEAT Salto	Requerimientos Anuales de Riego (mm)	CONEAT Treinta y Tres	Requerimientos Anuales de Riego (mm)	CONEAT Colonia	Requerimientos Anuales de Riego (mm)	CONEAT Canelones	Requerimientos Anuales de Riego (mm)
Alfalfa	9.6	346	2.21	346	10.3	303	10.6	257
Alfalfa	12.11	324	4.1	374	10.8	305	10.8	255
Alfalfa	S10.21	320	10.7	356	11.2	308	11.1	268
Festuca	9.6	347	2.21	238	10.3	289	10.6	289
Festuca	12.11	315	4.1	264	10.8	299	10.8	283
Festuca	S10.21	324	10.7	249	11.2	302	11.1	304
Maiz Ciclo Corto					10.3	446		
Maiz Ciclo Corto					10.8	462		
Maiz Ciclo Corto					11.2	466		
Maiz Ciclo Medio	9.6	483	2.21	408	10.3	442	10.6	398
Maiz Ciclo Medio	12.11	423	4.1	421	10.8	442	10.8	390
Maiz Ciclo Medio	S10.21	433	10.7	414	11.2	461	11.1	418
Soja GM 4	9.6	408	2.21	369	10.3	392		
Soja GM 4	12.11	349	4.1	383	10.8	409		
Soja GM 4	S10.21	362	10.7	375	11.2	414		
Soja GM 5-6	9.6	422	2.21	347	10.3	389	10.6	426
Soja GM 5-6	12.11	389	4.1	361	10.8	402	10.8	419
Soja GM 5-6	S10.21	396	10.7	353	11.2	407	11.1	435
Soja GM 7-8					10.3	386		
Soja GM 7-8					10.8	407		
Soja GM 7-8					11.2	410		
Citricos (Navel)	9.6	405					10.6	323
Citricos (Navel)	S10.21	344					10.8	315
Citricos (Navel)							11.1	346
Durazno Temprano							10.6	371
Durazno Temprano							10.8	364
Durazno Temprano							11.1	390
Durazno Estacion							10.6	405
Durazno Estacion							10.8	398
Durazno Estacion							11.1	422
Manzano							10.6	432
Manzano							10.8	425
Manzano							11.1	456
Peral							10.6	425
Peral							10.8	432
Peral							11.1	456

Cuadro 11. Caudal máximo ($l\ s^{-1}\ ha^{-1}$) estimado para diferentes sitios de producción y cultivos.

	CONEAT Salto	Caudal Pico $l\ s^{-1}\ ha^{-1}$	CONEAT Treinta y Tres	Caudal Pico $l\ s^{-1}\ ha^{-1}$	CONEAT Colonia	Caudal Pico $l\ s^{-1}\ ha^{-1}$	CONEAT Canelones	Caudal Pico $l\ s^{-1}\ ha^{-1}$
Alfalfa	9.6	0,68	2.21	0,69	10.3	0,62	10.6	0,73
Alfalfa	12.11	0,68	4.1	0,69	10.8	0,62	10.8	0,74
Alfalfa	S10.21	0,67	10.7	0,68	11.2	0,62	11.1	0,73
Festuca	9.6	0,65	2.21	0,57	10.3	0,61		
Festuca	12.11	0,64	4.1	0,58	10.8	0,6		
Festuca	S10.21	0,64	10.7	0,57	11.2	0,61		
Maiz Ciclo Corto					10.3	0,93		
Maiz Ciclo Corto					10.8	0,92		
Maiz Ciclo Corto					11.2	0,91		
Maiz Ciclo Medio	9.6	0,98	2.21	0,86	10.3	0,94	10.6	0,91
Maiz Ciclo Medio	12.11	0,98	4.1	0,86	10.8	0,94	10.8	0,95
Maiz Ciclo Medio	S10.21	0,98	10.7	0,86	11.2	0,93	11.1	0,93
Soja GM 4	9.6	0,93	2.21	0,76	10.3	0,8		
Soja GM 4	12.11	0,93	4.1	0,78	10.8	0,81		
Soja GM 4	S10.21	0,93	10.7	0,76	11.2	0,81		
Soja GM 5-6	9.6	0,87	2.21	0,79	10.3	0,79		
Soja GM 5-6	12.11	0,86	4.1	0,79	10.8	0,79		
Soja GM 5-6	S10.21	0,86	10.7	0,79	11.2	0,8		
Soja GM 7-8					10.3	0,82		
Soja GM 7-8					10.8	0,82		
Soja GM 7-8					11.2	0,82		
Citricos (Navel)	9.6	0,59					10.6	0,52
Citricos (Navel)	S10.21	0,6					10.8	0,52
Citricos (Navel)							11.1	0,51
Durazno Temprano							10.6	0,64
Durazno Temprano							10.8	0,64
Durazno Temprano							11.1	0,64
Durazno Estacion							10.6	0,72
Durazno Estacion							10.8	0,7
Durazno Estacion							11.1	0,72
Manzano							10.6	0,75
Manzano							10.8	0,75
Manzano							11.1	0,75
Peral							10.6	0,75
Peral							10.8	0,75
Peral							11.1	0,75



Foto 5. Día de campo en ensayos bajo riego.

3. ESTIMACIÓN DE LAS NECESIDADES DE AGUA DE RIEGO CON DIFERENTES ESTRATEGIAS DE PLANIFICACIÓN DEL MISMO. SEGUNDO OBJETIVO

Esta parte del capítulo fue desarrollada con el objetivo inicial de generar información sobre las necesidades de riego de los cultivos, pasturas y frutales, a los efectos de la habilitación de proyectos y uso de agua para riego. Este trabajo estuvo realizado en colaboración con docentes e investigadores de la Facultad de Agronomía⁽¹⁾, técnicos del MGAP-RENARE⁽²⁾ e investigadores de INIA⁽³⁾.

Como se había mostrado en los ejemplos del capítulo anterior, la cantidad de agua usada para riego va a variar con el método de riego que se utiliza y fundamentalmente

en su programación. El método de riego, por sus diferentes diseños y eficiencias va a afectar la cantidad de agua utilizada en el riego. Pero, simultáneamente, la programación del mismo, permitirá mejorar la eficiencia de uso de agua para el riego, a través de un correcto manejo del riego teniendo en cuenta principalmente la variabilidad de las precipitaciones.

Se presenta ahora, al igual que en la primera parte de este capítulo, el segundo objetivo, que está compuesto por tres situaciones o estrategias de riego utilizadas en diferentes cultivos, pasturas o frutales. Algunos de los métodos o estrategias se han usado y se usan indistintamente para los mismos cultivos, claramente con diferentes eficiencias y posibilidades de mejorar la programación del riego; muchas veces determinado por las fuentes de agua, disponibilidad de equipos de riego y costumbres generales de los productores.

Dentro del segundo objetivo, se tuvo en cuenta tres estrategias de programación del riego:

- **Estrategia 1: Riego Sin Restricciones.** Se modela un régimen de riego en el cual se permite el agotamiento del agua en el suelo hasta el umbral del conte-

⁽¹⁾ Ing. Agr. MSc Lucía Puppo, Ing. Agr. MSc Raquel Hayashi, Ing. Agr. Dr. Pablo Morales.

⁽²⁾ Ing. Agr. Gervasio Finozzi, Ing. Hidr. Amb. MSc Paola Pedemonte, Ing. Hidr. Amb. Florencia Hasting, Ing. Agr. Daniel Silveira, Ing. Agr. Juan Pedro Herrera, Ing. Agr. Pablo Lacuesta, Ing. Agr. MSc Delgado Silvana, Ing. Amb. MSc María Bettina Miguez.

⁽³⁾ Ing. Agr. MSc Alvaro Otero, Ing Agr. Dr Claudio García, Ing. Agr. Dr Francisco Montoya, Ing. Agr. MSc. María Cristina Capurro.

nido de agua en el suelo (P) y con una lámina de reposición hasta llegar a capacidad de campo cada vez que se riega. Riego sin mayores restricciones que las apropiadas para realizar un buen riego.

- **Estrategia 2: Riego con Lámina Fija de 10 mm.** Se modela un régimen de riego donde también se permite el agotamiento del agua en el suelo hasta el umbral P, pero con una lámina de reposición fija de 10 mm en cada riego realizado. El propósito de esta estrategia de riego es simular las condiciones de riego de alta frecuencia, habitualmente encontradas en los riegos por goteo o pivot, donde se permite el agotamiento del suelo hasta el umbral preestablecido (P).

Estrategia 3: Riego de Alta Frecuencia y Bajos Caudales (8-10 mm). Se modela un régimen de riego de alta frecuencia con la aplicación de una lámina de riego de 10 mm, similar al anterior. En esta estrategia se estimó un umbral de agotamiento del suelo (P) equivalente a un agotamiento del suelo de 10 mm, igual a la lámina de reposición. Este nuevo valor de P (%) debió ser estimado para cada suelo y para cada cultivo (profundidad del sistema radicular, fenología). El propósito de esta estrategia es simular aplicaciones de alta frecuencia (10 mm) al igual que el escenario 2, simulando una programación del riego que riega casi a diario; reponiendo cantidades de agua muy pequeñas todos los días, semejando las condicio-

Cuadro 12. Requerimientos anuales de agua para riego en función de la programación de riego prevista. Salto.

Salto	Requerimientos Anuales de Agua para Riego (mm)			
	Grupo Coneat	Riego Sin Restricciones	Lámina 10 mm	Alta Frecuencia (10 mm)
Alfalfa	9.6	432	340	597
Alfalfa	12.11	349	270	547
Alfalfa	S10.21	333	280	523
Festuca	9.6	472	360	606
Festuca	12.11	374	280	563
Festuca	S10.21	363	290	523
Maiz_Medio	9.6	507	460	687
Maiz_Medio	12.11	497	400	661
Maiz_Medio	S10.21	474	420	656
Soja GM 4	9.6	430	440	650
Soja GM 4	12.11	406	411	622
Soja GM 4	S10.21	415	426	581
Soja GM 5-6	9.6	509	483	680
Soja GM 5-6	12.11	483	426	668
Soja GM 5-6	S10.21	471	477	649
Citricos_Navel	S09.21	471	430	646
Citricos_Navel	S10.21	420	320	582
Citricos_Navel	12.11	480	300	568

Cuadro 13. Requerimientos anuales de agua para riego en función de la programación de riegos prevista. Colonia.

Colonia	Requerimientos Anuales de Agua para Riego (mm)			
	Grupo Coneat	Riego Sin Restricciones	Lámina 10 mm	Alta Frecuencia (10 mm)
Alfalfa	10.3	331	300	590
Alfalfa	10.8	405	310	563
Alfalfa	11.7	361	310	591
Festuca	10.3	372	290	491
Festuca	10.8	371	310	543
Festuca	11.7	338	310	536
Maiz_Corto	10.3	520		684
Maiz_Corto	10.8	519		683
Maiz_Corto	11.7	539		663
Maiz_Medio	10.3	569	460	640
Maiz_Medio	10.8	585	480	636
Maiz_Medio	11.7	572	480	645
Soja GM 4	10.3	478	410	634
Soja GM 4	10.8	462	410	628
Soja GM 4	11.7	482	410	638
Soja GM 5-6	10.3	498	390	660
Soja GM 5-6	10.8	499	400	664
Soja GM 5-6	11.7	514	400	660
Soja GM 7-8	10.3	471	380	660
Soja GM 7-8	10.8	490	390	614
Soja GM 7-8	11.7	492	400	664

nes de riego en climas con nula o muy escasa precipitación.

En las cuatro regiones productivas analizadas, se observa cómo a través de la correcta programación del riego, se pudo ahorrar agua de riego en forma importante (Cuadros 12-15) y con el ejemplo de los cuadros 4 y 5, se aprecia también el ahorro en el uso de la energía, evaluada a través de la disminución del número de riegos.

El riego de alta frecuencia, que permita solo el agotamiento del agua en el suelo,

hasta láminas de reposición de 8-10 mm, parecería ser muy poco aconsejable para las condiciones de Uruguay, ya que utilizaría mayor cantidad acumulada de agua para riego, con más turnos de riego que cualquier otro método. Dependiendo del cultivo, se utiliza entre un 15 y 55 % más de agua que un riego sin restricciones. En el caso de las pasturas, en el ejemplo alfalfa y festuca, esta diferencia está alrededor del 60 %. Esta forma de regar es frecuentemente usada en sistemas localizados o de pivot, aconsejada en

Cuadro 14. Requerimientos anuales de agua para riego en función de la programación de riego prevista. Canelones.

Canelones	Requerimientos Anuales de Agua para Riego (mm)			
	Grupo Coneat	Riego Sin Restricciones	Lámina 10 mm	Alta Frecuencia (10 mm)
Alfalfa	10,6	326	280	524
Alfalfa	10,8	347	280	540
Alfalfa	11,1	360	310	564
Festuca	10,6	347	320	481
Festuca	10,8	327	290	547
Festuca	11,1	398	300	554
Maiz_Corto	10,6			650
Maiz_Corto	10,8			650
Maiz_Corto	11,1			649
Maiz_Medio	10,6	472	420	750
Maiz_Medio	10,8	462	400	756
Maiz_Medio	11,1	496	430	740
Soja GM 5-6	10,6	486	430	616
Soja GM 5-6	10,8	510	420	607
Soja GM 5-6	11,1	499	450	610
Citricos_Navel	10,6	402	340	503
Citricos_Navel	10,8	398	320	
Citricos_Navel	11,1	431	380	503
Duranzo Temprano	10,6	446	390	556
Duranzo Temprano	10,8	405	375	
Duranzo Temprano	11,1	447	390	561
Duranzo Estación	10,6	472	420	568
Duranzo Estación	10,8	458	400	
Duranzo Estación	11,1	478	440	573
Pera	10,6	519	440	597
Pera	10,8	506	410	570
Pera	11,1	520	470	581
Manzana	10,6	518	440	681
Manzana	10,8	506	420	
Manzana	11,1	520	470	673

Cuadro 15. Requerimientos anuales de agua para riego en función de la programación de riego prevista. Treinta y Tres.

Treinta y Tres	Requerimientos Anuales de Agua para Riego (mm)			
	Grupo Coneat	Riego Sin Restricciones	Lámina 10 mm	Alta Frecuencia (10 mm)
Alfalfa	2.21	403	360	488
Alfalfa	4.1	427	390	496
Alfalfa	10.7	409	380	498
Festuca	2.21	321	270	502
Festuca	4.1	329	271	507
Festuca	10.7	334	280	518
Maiz_Medio	2.21	412	380	636
Maiz_Medio	4.1	466	400	639
Maiz_Medio	10.7	457	420	642
Soja GM 5-6	2.21	477	390	
Soja GM 5-6	4.1	483	410	
Soja GM 5-6	10.7	493	390	

lugares donde la pluviometría es muy escasa o nula; pero no muy aconsejada en las condiciones agroecológicas de Uruguay.

El efecto de los suelos en la estrategia comparada de programación del riego, no ha tenido mayores diferencias que las obtenidas por el cultivo y la programación propiamente dicha.

Regar con láminas pequeñas de 8 a 10 mm, –láminas dadas fundamentalmente por el diseño del sistema– permite un ahorro sustancial en el uso de agua para riego; de hecho es la programación de riego más satisfactoria desde el punto de vista de la eficiencia de uso del agua y de los recursos hídricos en general, ya que permite dejar el perfil de suelo con la mínima cantidad de agua que no provoque estrés o reducción del rendimiento en el cultivo, y lo suficientemente seco como para aprovechar toda el agua de lluvia que potencialmente pueda infiltrar en el suelo. Sin embargo, desde el punto de vista energé-

tico, se consume más energía al haber mayor turnos de riego que en el riego sin restricciones de láminas (Cuadros 4 y 5). Regar con láminas relativamente pequeñas, puede ser usado satisfactoriamente en sistemas de pivot o alas de desplazamiento lateral, y también en producción de vegetales intensivos como es el caso de los cítricos con sistemas con goteros o microjet.

En general, la estrategia 1, de riego sin restricciones de lámina, permite una reducción importante en el número de riegos realizados, pero debe de ser posible tener láminas más grandes, de allí que es un método muy apropiado a métodos de riego por superficie o a sistemas de goteros/microjet donde se pueda ampliar el turno de riego, permitiendo aumentar el caudal de agua en la planta. De esta forma se pueden hacer riegos muy eficientes ya sea en el consumo de agua en el riego, como en el uso de la energía.

4. RESUMEN

- Los modelos de Balance Hídrico del Suelo (BHS) son herramientas muy útiles para la programación del riego, así como para la evaluación de diferentes estrategias de riego y determinar las necesidades de agua para riego en una región particular.
- La necesidad de agua para riego en las condiciones de Uruguay, van a cambiar -para un mismo cultivo- de acuerdo a la región dentro del país que se esté trabajando.
- Las necesidades de riego que se presentaron son necesidades netas de riego durante el crecimiento y desarrollo del cultivo. La lámina neta de riego debe ser corregida por la eficiencia del sistema o método de riego utilizado a los efectos de determinar la lámina bruta de riego, que será la que realmente apliquemos al cultivo.
- En el caso de alfalfa y festuca, se necesitarán entre 250 y 350 mm anuales de agua de riego neto (sin tomar en cuenta la eficiencia del sistema de riego), para satisfacer en el 80 % de los años los potenciales de rendimiento.
- Para cultivos como maíz y soja, se necesitarán entre 350 y 500 mm anuales de agua de riego neto, en las diferentes zonas de Uruguay.
- Los caudales máximos o pico, están relacionados con la máxima demanda diaria, con 0,60 y 0,79 l s⁻¹ ha⁻¹ en pasturas y de 0,70 a 1,0 l s⁻¹ ha⁻¹ para cultivos como maíz y soja.
- La programación del riego, permite ahorrar en forma importante el agua para el riego, al mismo tiempo que podemos utilizar en forma más eficiente el agua, se puede ahorrar energía, principalmente de bombeo.
- Esta tarea debe de ser pensada desde el mismo diseño del sistema de riego, a los efectos que este se adapte bien y flexiblemente, a las condiciones variables de precipitación, y a la infiltración y topografía de nuestros suelos.
- El correcto diseño del sistema de riego para cada caso particular, requiere de decisiones exclusivas para cada situación a regar. El riego de precisión es una herramienta más dentro de todas las tecnologías de producción utilizadas en Uruguay.

CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DEL MODELO AQUACROP COMO HERRAMIENTA PARA LA AYUDA EN LA TOMA DE DECISIONES EN RIEGO. CASO DEL CULTIVO DE SOJA EN SALTO

Francisco Montoya*

Álvaro Otero**

1. INTRODUCCIÓN

En los dos capítulos anteriores se ha podido ver algunos de los posibles usos y manejos que ofrecen los modelos de balance hídrico del suelo, en este caso el modelo WinISAREG. Si bien el modelo constituye una ayuda para la toma de decisiones en riego, por sí sólo no ofrece el interés que la amplia mayoría de usuarios (productores, técnicos, gestores de áreas regables, economistas) tiene en este tipo de herramientas, que es conocer el rendimiento final del cultivo y su comportamiento frente a la aplicación de agua.

Para la determinación del rendimiento de un cultivo intervienen muchos procesos en donde los sistemas agrobiológicos, en este caso suelo-planta-atmósfera, son altamente complejos con componentes que interactúan simultáneamente y con interacciones que en algunos casos son desconocidas. Es por ello que para representar estos sistemas se realiza una simplificación de la realidad (MacKerron, 2007; Steduto et al., 2009), originando modelos que están formados por diversos componentes (subrutinas de cálculo) donde tienen en cuenta el suelo y sus interacciones con la fisiología de la planta y la climatología (descomposición de materia orgánica, erosión, absorción de elementos minerales, agua, fenología del cultivo, crecimiento y rendimiento final).

Hoy en día existen muchos modelos de simulación de cultivos capaces de simular un amplio rango de cultivos, bien sean herbáceos o leñosos (DSSAT, CropSyst, EPIC, ALMANAC, APSIM, AquaCrop, MOPECO, STICS, entre otros). A la hora de elegir un modelo como herramienta de ayuda en la toma de decisiones se busca que exista, entre sus características, un equilibrio entre simplicidad, precisión y robustez. Son estos aspectos lo que hace que un modelo sea más o menos atractivo para el usuario final.

Entre los diferentes modelos indicados, el modelo AquaCrop, creado y mantenido por la división de Aguas y Riegos de la FAO, se caracteriza por presentar las características anteriormente indicadas (Steduto et al., 2009). La particularidad que tiene AquaCrop de relacionar el agua recibida por el cultivo con su rendimiento final ha permitido que, desde su lanzamiento en 2009, exista a nivel global un gran interés de la comunidad científica en el parametrizado, calibrado y validado del modelo para un amplio conjunto de cultivos de ciclo anual bajo diferentes ambientes (Vanuytrech et al., 2014; Montoya et al., 2016).

En el caso de la evaluación del modelo AquaCrop con el cultivo de soja, este se ha llevado a cabo bajo diferentes condiciones ambientales (Abi Saab et al., 2014; Paredes et al., 2015). Sin embargo, no existen trabajos en el área de Salto (Uruguay) sobre la aplicación del modelo como herramienta de ayuda

* Ing. Agr., Dr. Programa de Investigación en Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA Salto Grande (hasta Mayo 2016).

** Ing. Agr., MSc. Programa de Investigación en Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA Salto Grande.

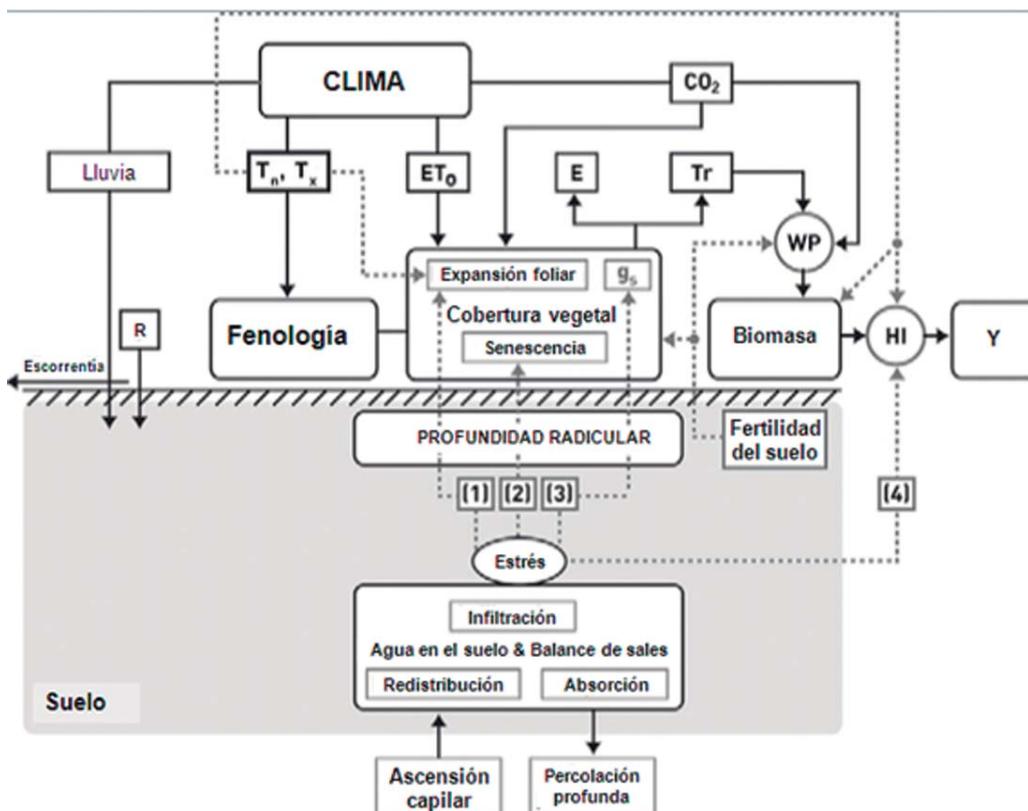
para la toma de decisiones. Por tanto, en este capítulo se desarrollan a modo de ejemplo varios aspectos con el uso y aplicación del modelo: a) evaluar el comportamiento del modelo para la simulación del rendimiento final del cultivo de soja bajo diferentes requerimientos hídricos del cultivo; b) analizar si el riego suplementario es útil sobre la estabilidad productiva del cultivo; c) búsqueda de estrategias para la gestión de recursos hídricos en explotaciones de riego; y d) herramienta de ayuda para el diseño de los sistemas de riego.

2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO AQUACROP

El crecimiento del cultivo en AquaCrop es simulado diariamente mediante el desarrollo

de la cubierta vegetal verde que transpira agua y un sistema radicular que profundiza y absorbe agua (Raes et al., 2009). Durante la simulación, AquaCrop realiza en grandes líneas los siguientes procesos: separa evapotranspiración (ET) en transpiración del cultivo (Tr) y evaporación del suelo (E); desarrolla un modelo de crecimiento y senescencia de la cubierta como base para la estimación de la Tr y su separación de la E; trata el rendimiento final (Y) como una función de la materia seca final (B) y el índice de cosecha (HI), y, por último, segrega los efectos del estrés hídrico en cuatro componentes: crecimiento de la cubierta vegetal, senescencia de la cubierta vegetal, Tr e HI (Steduto et al., 2009).

La separación de ET en Tr y E evita los efectos de confusión en el uso consuntivo



R: riego; Tn: temperatura mínima del aire; Tx: temperatura máxima del aire; ET₀: evapotranspiración de referencia; E: evaporación del suelo; Tr: transpiración de la cubierta vegetal; gs: conductancia estomática; WP: productividad del agua; HI: índice de cosecha; CO₂: concentración atmosférica de dióxido de carbono; (1), (2), (3), (4): diferentes funciones de respuesta al estrés hídrico. Líneas continuas: enlace directo entre variables y procesos. Líneas discontinuas: señalan las vías de retroalimentación. Fuente: Steduto et al. (2009).

Figura 24. Diagrama de AquaCrop con los aspectos principales del continuo suelo-planta-atmósfera y los parámetros que conducen la fenología, la cobertura del cultivo, la transpiración, la producción de biomasa y el rendimiento final.

de agua no productivo (E) el cual es importante, especialmente, cuando la cobertura del suelo por el cultivo es incompleta, permitiendo aplicar la ecuación principal en la que se basa el crecimiento de los cultivos en AquaCrop (Steduto et al., 2009).

$$B = WP^* \cdot \sum \left(\frac{Tr}{ET_0} \right) \tag{1}$$

donde: B: biomasa (g MS m⁻²); WP*: productividad del agua normalizada (g m⁻²); Tr: transpiración del cultivo (mm); ET₀: evapotranspiración de referencia (mm).

Una de las mayores ventajas que ofrece la utilización de la WP en su módulo de crecimiento del cultivo, es que la variable WP es normalizada para las condiciones climáticas (tanto demanda evaporativa como concentración atmosférica de CO₂), lo que tiene una mayor aplicabilidad en el espacio y en el tiempo (Steduto y Albrizio, 2005; Hsiao et al., 2007).

Las relaciones funcionales entre los diferentes componentes de AquaCrop son mostrados en la figura 24. La evolución en el crecimiento de la planta y su relación con el estado hídrico del suelo y la demanda evaporativa de la atmósfera son los aspectos más distintivos del modelo, donde los efectos del estrés hídrico inciden en los cuatro componentes ya indicados (Steduto et al., 2009).

El balance de agua en el suelo es obtenido en base diaria donde se incluyen los procesos de infiltración, escurrimiento, percolación, absorción, evaporación, transpiración y ascensión capilar.

El esquema de cálculo que sigue el modelo AquaCrop es el indicado en la figura 25. En ella se puede observar que para determinar la transpiración, y por tanto la biomasa del cultivo, es necesario el cálculo del grado de cobertura verde del cultivo (CC) donde

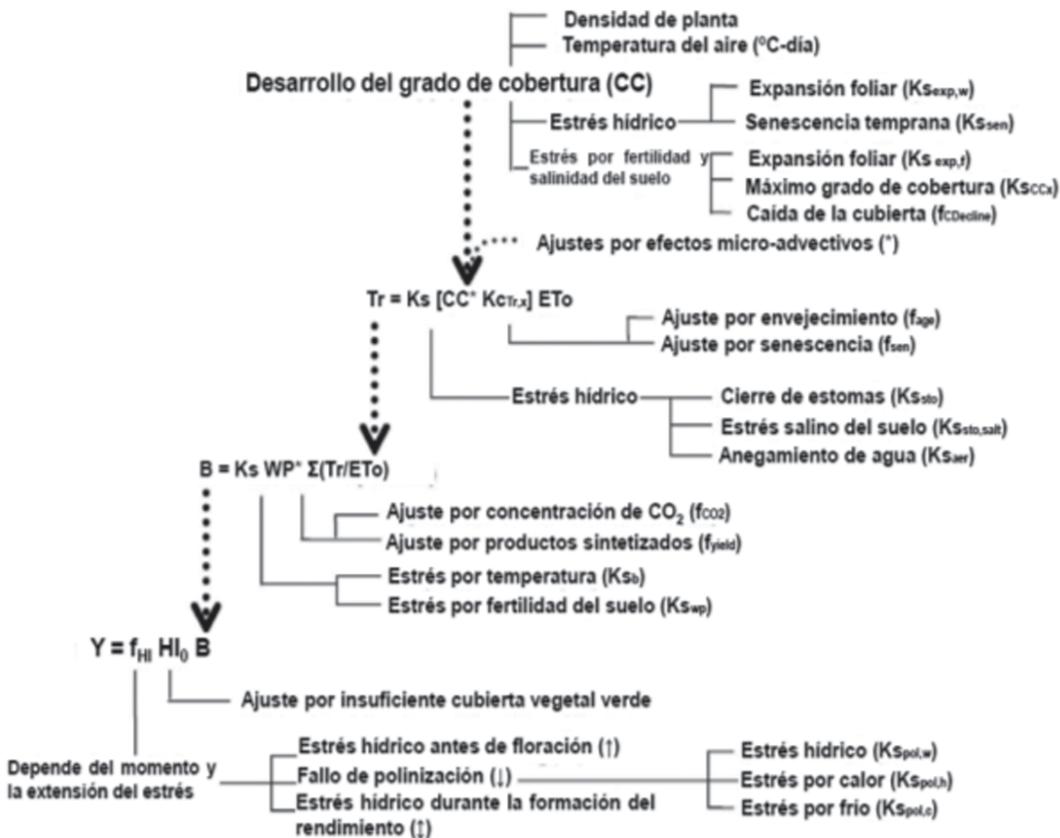


Figura 25. Esquema de cálculo del modelo AquaCrop. Fuente: Raes et al. (2012).

influyen los efectos del estrés hídrico, por fertilidad y salinidad del suelo. En cuanto al Y (Rendimiento), éste es obtenido del producto de HI de referencia (HI_0) por la B (Biomasa), siendo afectado por factores de estrés hídrico y térmico a lo largo de la formación del rendimiento (Y).

La versión utilizada para realizar las simulaciones fue la versión 5.0; la cual está disponible en la siguiente web: <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>. El manual de AquaCrop (Raes et al., 2012), incluye la guía del usuario, los procedimientos de cálculo y anexos con los parámetros necesarios para simular algunos cultivos representativos, entre ellos la soja.

3. ENSAYO EXPERIMENTAL UTILIZADO PARA LA CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO AQUACROP

Los datos experimentales utilizados para calibrar y validar el modelo con soja se corresponden con dos ensayos de campo realizados en Salto, Uruguay (31°22'31" S, 57°42'54" W, altitud 78 m) durante las campañas 2014-2015 y 2015-2016, los cuales se recogen en Montoya et al. (in prensa). En ambas zafas, los experimentos se realizaron sobre un suelo Vertic Argiudolls (USDA, 2006), compuesto por un horizonte A (0,35 m de profundidad) y un horizonte B (0,40 m de profundidad) de textura arcillosa (composición: 8,8 % arena, 38,6 % limo y 52,6 % de arcilla). Los parámetros de capacidad de

campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) fueron determinadas a través de las ollas de Richard de extracción de la humedad del suelo con muestras imperturbadas realizadas a diferentes profundidades (hasta 0,50 m). La conductividad hidráulica saturada fue determinada usando ecuaciones empíricas (Saxton et al., 1986), mientras que la curva número (CN) fue determinado de acuerdo al NCRS (2004) (Cuadro 16).

Los datos climáticos de ambos años experimentales fueron obtenidos a partir de una estación agrometeorológica Davis (Davis Instruments Corp. Inc., CA, USA) próxima al área de ensayo (Cuadro 17). Durante los meses de verano de ambas zafas se alcanzaron las mayores temperaturas, siendo los meses de enero y febrero los más calurosos del año. La precipitación acumulada durante el ciclo del cultivo fue de 730 mm (2014-2015) y 1174 mm (2015-2016). La evapotranspiración de referencia (ET_0) fue calculada de acuerdo a la ecuación de FAO-Penman Monteith (Allen et al., 1998).

El diseño experimental en ambos años de ensayo consistió en la aplicación de cuatro tratamientos de lámina de riego aplicado por goteo en diferentes etapas fenológicas (100-100 %, T1; 100-75 %, T2; 100-50 %, T3 y secano, T4) con tres repeticiones (Montoya et al., in prensa). El tratamiento testigo (100-100 %, T1) consistió en proporcionar los requerimientos hídricos a lo largo del ciclo del cultivo para lograr la máxima producción de acuerdo a la metodología FAO (Allen et al., 1998). Los tratamientos 2 y 3 (T2 y T3) recibieron desde siembra hasta inicio de la floración el 100 %

Cuadro 16. Contenido volumétrico de agua en el suelo (Hv%), conductividad hidráulica saturada y la curva número (CN) del suelo del ensayo experimental.

Profundidad (m)	CC (%)	PMP (%)	Ksat (mm day ⁻¹)	CN
0-0,10	55,60	38,15	150,0	86
0,10-0,20	52,40	44,00	35,0	
0,20-0,30	58,90	45,60		
0,30-0,40	56,90	43,20		
0,40-0,50	60,90	49,60		

CC: capacidad de campo (0,01 MPa); PMP: punto de marchitez permanente (1,5 MPa); Ksat: conductividad hidráulica saturada.

Cuadro 17. Condiciones climáticas durante las zafras 2014-2015 y 2015-2016.

Año	Mes	Tmax media (°C)	Tmin media (°C)	Rad media (MJ m ⁻² día ⁻¹)	P acumu- lada (mm)	ET ₀ acumu- lada (mm)
2014	Noviembre	27,9	16,0	21,5	179,6	143,1
	Diciembre	28,6	17,2	21,7	232,9	169,5
2015	Enero	30,6	18,4	22,0	205,4	168,5
	Febrero	31,3	18,4	21,3	61,3	165,0
	Marzo	30,0	16,2	18,2	24,5	161,3
	Abril	28,9	12,5	15,1	25,4	139,1
	Noviembre	25,6	14,1	18,8	157,6	145,5
	Diciembre	29,0	17,4	19,0	385,0	156,0
2016	Enero	32,5	19,3	22,8	42,1	205,9
	Febrero	32,1	19,4	22,8	223,0	154,7
	Marzo	27,4	15,3	18,5	12,0	112,8
	Abril	23,1	15,7	8,9	354,4	56,5

Tmax: temperatura máxima diaria; Tmin: temperatura mínima diaria; Rad: radiación solar diaria; P: precipitación; ET₀: evapotranspiración de referencia (FAO-Penman Monteith).

Cuadro 18. Lámina de riego recibida por el cultivo en ambos años experimentales.

Tratamiento de riego	% RHC*	Lámina de riego (mm)	
		2014-2015	2015-2016
T1	100-100%	382,7	309,5
T2	100-75%	282,7	236,5
T3	100-50%	201,6	116,6
T4	Secano	–	–

*Requerimientos hídricos del cultivo (RHC) de acuerdo a dos etapas fenológicas, desde siembra hasta inicio de floración (etapa vegetativa) y desde el inicio de floración a madurez comercial (etapa reproductiva).

de los requerimientos hídricos del cultivo, mientras que desde la etapa de floración hasta la maduración del cultivo se modificó la estrategia de riego con el fin de que recibiesen un determinado porcentaje de satisfacción, es decir, T2 el 75 % y T3 el 50 % de los requerimientos hídricos del cultivo (Cuadro 18). El tratamiento de secano (T4) recibió únicamente la precipitación ocurrida durante el ciclo. La programación de riegos realizada en el ensayo y la estimación de la evapotranspiración actual del cultivo viene detallado en Montoya et al. (in prensa).

Los datos relativos a la densidad de planta establecida en ambas zafras, máxima profundidad radicular observada en campo y período

de desarrollo del cultivo usado para la calibración y validación del modelo se recoge en el cuadro 19. La diferencia de días en la fecha de siembra entre ambos años se debió a las condiciones de precipitación ocurridas. No obstante, el ciclo del cultivo fue muy similar entre ambos años (Cuadro 19). En ambas zafras la siembra se realizó sobre un «puente verde» de raygras, el cual cubría el suelo en un 25 % en el primer año de ensayo (800 kg ha⁻¹ de restos vegetales), mientras que la cobertura del suelo en el segundo año fue del 85 % (3500 kg ha⁻¹). Se practicaron las técnicas tradicionales de manejo del cultivo contra plagas y enfermedades para maximizar el rendimiento y la calidad (Montoya et al., in prensa).

Cuadro 19. Datos de cultivar de soja, densidad de planta, desarrollo del cultivo y máxima profundidad radicular usados para la calibración y validación del modelo AquaCrop.

Campaña experimental	n	Cultivar	Densidad de planta (planta m ⁻²)	Fecha de siembra	Emergencia ¹	Inicio de floración ¹	Senescencia ¹	Madurez ¹	Máxima profundidad radicular (m)
2014-2015*	4	6262	41,2	8 de noviembre	8	64	113	145	0,45
2015-2016**	4	I PRO-DM	28,0	24 de noviembre	8	58	115	145	0,45

n: número de tratamientos de riego; (1): datos referidos a días después de la siembra; (*): año de calibración; (**): año de validación.

Cuadro 20. Biomasa, rendimiento e índice de cosecha obtenido en ambos años de ensayo.

	Tratamiento	Biomasa (t ha ⁻¹)	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Índice de cosecha
2014-2015	T1	9,236 b	3,951 cb	0,43
	T2	9,583 b	4,306 c	0,45
	T3	8,715 b	3,739 b	0,43
	T4	6,840 a	2,787 a	0,41
p-valor		p<0,05	p<0,01	ns
2015-2016	T1	8,196 b	3,898 b	0,48
	T2	8,471 b	4,039 b	0,48
	T3	8,112 b	3,720 b	0,46
	T4	5,681 a	2,631 a	0,46
p-valor		p<0,05	p<0,05	ns

ns: no significativo. Medias en las columnas seguidas de diferente letra son significativamente distintas por el test de diferencia de medias de Tukey (p<0,05).

El contenido de agua en el suelo fue medido a través de sensores FDR (Decagon Devices 10HS, Pullman, WA, USA). Un juego de cinco sensores se instalaron en cada parcela experimental, cubriendo una profundidad total de 0,50 m. Por consiguiente, los sensores se instalaron a intervalos de 0,10 m de profundidad. Los datos tomados por los sensores eran registrados cada 20 minutos. De acuerdo a la lectura de los sensores, no se detectó ascensión capilar, mientras que sí se observó percolación por debajo de la profundidad radicular máxima del cultivo (0,45 m medido en campo, así como escorrentía superficial en los momentos en que se producían importantes eventos de lluvia (>30 mm).

La evolución de biomasa y rendimiento del cultivo en todos los tratamientos se determinó mediante muestreo de planta en un intervalo de 15-20 días (Montoya et al., in prensa). Respecto a la evolución del grado de cobertura del cultivo (CC; datos no mostrados), este fue determinado a través de la medida de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) interceptada por el cultivo mediante el uso de un ceptómetro LP-80 (Decagon Devices Inc., Pullman, WA), siguiendo la metodología propuesta por Farahani et al. (2009).

La cosecha del cultivo se procedió una vez que la soja se encontró en madurez fisiológica y con un contenido de humedad en la semilla próximo al 13 %. Para ello, en cada parcela experimental se tomaron tres repeticiones de 1,6 m² cada una, correspondientes a 2 m de largo y dos líneas de plantación. En cada repetición se tomaron los datos de número y peso total de plantas cosechadas para obtener la biomasa (kg ha⁻¹), el rendimiento (kg ha⁻¹) y el índice de cosecha (HI) (Cuadro 20).

3.1. Calibración y validación del modelo

La calibración y validación del modelo AquaCrop (v 5.0) se realizó con los cuatro tratamientos de riego realizados en ambas zafas de ensayo, utilizándose los datos experimentales del año 2014-2015 para la calibración del modelo, mientras que la validación se efectuó con los datos de la zafa 2015-2016. Si bien es recomendable que se

utilicen al menos dos años de ensayo para la calibración del modelo, Abi Saab et al. (2015) mostraron en un trabajo realizado con cebada que con un sólo año de datos es suficiente para la calibración de AquaCrop.

Los parámetros necesarios para la calibración del modelo así como una amplia y profunda descripción del mismo se encuentra detallado en Steduto et al. (2009), Raes et al. (2009), Hsiao et al. (2009), Vanuytrech et al. (2014), en el manual de referencia (Raes et al., 2012) y en el documento n° 66 de Riegos de Drenajes de FAO "Crop Yield Response to Water" (Steduto et al., 2012).

El análisis de la bondad de ajuste relativo al procedimiento de calibración y validación del modelo fue realizada mediante un conjunto de indicadores utilizados en el ámbito de los modelos agrícolas. Para ello se realizó la regresión lineal entre los valores simulados y observados de biomasa y rendimiento en cosecha, índice de cosecha y la evapotranspiración del cultivo estacional, obteniendo la pendiente, la intercepción y los coeficientes de correlación para cada parámetro indicado. Otros estadísticos también utilizados para estudiar la bondad de ajuste del modelo son la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el índice de agregación de Willmot (IoA) (Willmott, 1982). En el proceso de calibración del modelo se pretendió que RMSE estuviesen lo más cercano a 0. Respecto a IoA, indicador de la calidad del modelo, se pretendió un valor objetivo de 1,0 para cada parámetro analizado, mientras que un valor nulo de ellos representa que la media de las observaciones es igual o mejor predicha que el modelo.

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (2)$$

donde: RMSE es la raíz del error cuadrático medio, S_i es el valor simulado, O_i es el valor observado; n es el número de medidas.

$$IoA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (3)$$

donde: IoA es el índice de agregación de Willmott, O es el valor medio de los "n" valo-

res medidos, S_i es el valor simulado, O_i es el valor observado, n es el número de medidas.

4. APLICACIÓN DEL MODELO AQUACROP

4.1. Descripción de los años climáticos

Los apartados b, c y d ya indicados anteriormente y que se pretenden utilizar como posibles aplicaciones del modelo AquaCrop fueron realizados bajo las condiciones meteorológicas de la zona de Salto. Para el análisis del rendimiento de la soja, requerimientos de agua de riego por el cultivo y su demanda evapotranspirativa se utilizaron los datos climáticos de la estación meteorológica de INIA Salto Grande (<http://www.inia.uy/gras/Clima>), la cual se ubica en el área de estudio. El número de años utilizados para la aplicación del modelo han sido de 35 (1980-2014). La serie de años de estudio fue clasificada por el centro de predicción climática de Estados Unidos (CPC, 2016) como años Normales (N; 15 en total), años de La Niña (ñ; 9 en total) y años de El Niño (Ñ; 11 en total).

Aunque el período de años utilizado en este capítulo difiere del período dado en el capítulo 2, se puede decir que la distribución mensual de precipitaciones y de ET_0 es muy similar, por lo que en este capítulo no se hace ninguna descripción de los mismos. Tan sólo destacar, respecto a la precipitación, que la tendencia media de precipitación total acumulada para los años N y ñ tiende a incrementarse en los meses posteriores a enero, mientras que los años Ñ se tiene un comportamiento más uniforme a lo largo de los meses.

4.2. Hipótesis de aplicación del modelo

La aplicación del modelo se realiza bajo la situación de secano y de riego, donde se establecen los mismos criterios de tipo de suelo y de manejo del cultivo que los indicados en la calibración del modelo, con una cobertura del

suelo con mulch orgánico de un 85 % ya que es la práctica habitual en la zona para evitar la erosión de suelo por las altas precipitaciones. La fecha de siembra que es estableció en el modelo fue el 5 de noviembre.

Las simulaciones correspondientes a la situación de riego se llevaron a cabo sin establecer una lámina máxima a aplicar al cultivo debido a que, uno de los ejemplos prácticos planteados es el de conocer los requerimientos de agua de riego del cultivo manejado bajo riego suplementario. Por ello, la programación del riego se realiza en base a dos criterios desde el inicio del ciclo del cultivo. Un primer criterio, cuándo regar, el cuál es definido con el porcentaje de agua que se permite agotar en el suelo, estableciéndose en el 100 % del agua fácilmente disponible por el cultivo. El segundo criterio, cuánto regar, se decidió establecer una lámina fija de agua de riego, se optó por una lámina neta de 10 mm aplicada mediante sistema de riego pivot. Esta lámina se considera adecuada para un equipo pivot de 40 ha, teniendo en cuenta la jornada efectiva de riego y los tipos de suelos característicos de la zona.

Aunque en el área de estudio se practica el riego por superficie de cultivos, principalmente arroz y en menor medida otros cultivos como maíz, sorgo y soja (Failde et al., 2013), es necesario resaltar que durante los últimos 10 años se ha producido un importante aumento en el número de equipos pivot instalados (Failde et al., 2013; Morales et al., 2014). Es por ello que se optó por la aplicación de agua de riego mediante este sistema de riego.

5. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL USO Y APLICACIÓN DEL MODELO AQUACROP

5.1. Calibración y validación del modelo AquaCrop

Los parámetros más destacados del modelo utilizados en la calibración y validación de la soja son presentados en la cuadro 21. En general, los resultados de biomasa, rendimiento y evapotranspiración total acumulada simulados por AquaCrop mostraron una alta concordancia con los datos observados

Cuadro 21. Parámetros para la simulación de soja usando el modelo AquaCrop.

Parámetro	Valor	Fuente
Crecimiento del cultivo y desarrollo		
Coefficiente de crecimiento de la cobertura vegetal del cultivo, % °C ⁻¹ día ⁻¹	0,61	cv
Coefficiente de caída de la cobertura vegetal del cultivo, % °C ⁻¹ día ⁻¹	0,53	cv
Productividad del agua, g m ⁻²	15,0	cv
Productividad del agua durante la formación del rendimiento (%)	60	cv
Formación del rendimiento		
Índice de cosecha de referencia, %	44,0	cv
Estrés hídrico del suelo		
Umbral superior para el crecimiento de la cubierta vegetal	0,15	b ¹
Umbral inferior para el crecimiento de la cubierta vegetal	0,65	b ¹
Umbral superior para el cierre de estomas	0,55	e
Umbral superior para la senescencia temprana	0,70	b ¹
Factor de forma para la expansión de la cubierta vegetal	6	e
Factor de forma para el cierre de estomas	6	e
Factor de forma para la senescencia temprana	6	e

cv: calibrado y validado usando los datos de campo (Salto, Uruguay); b: obtenido de la bibliografía; e: estimado de los datos de campo; Steduto et al. (2012).

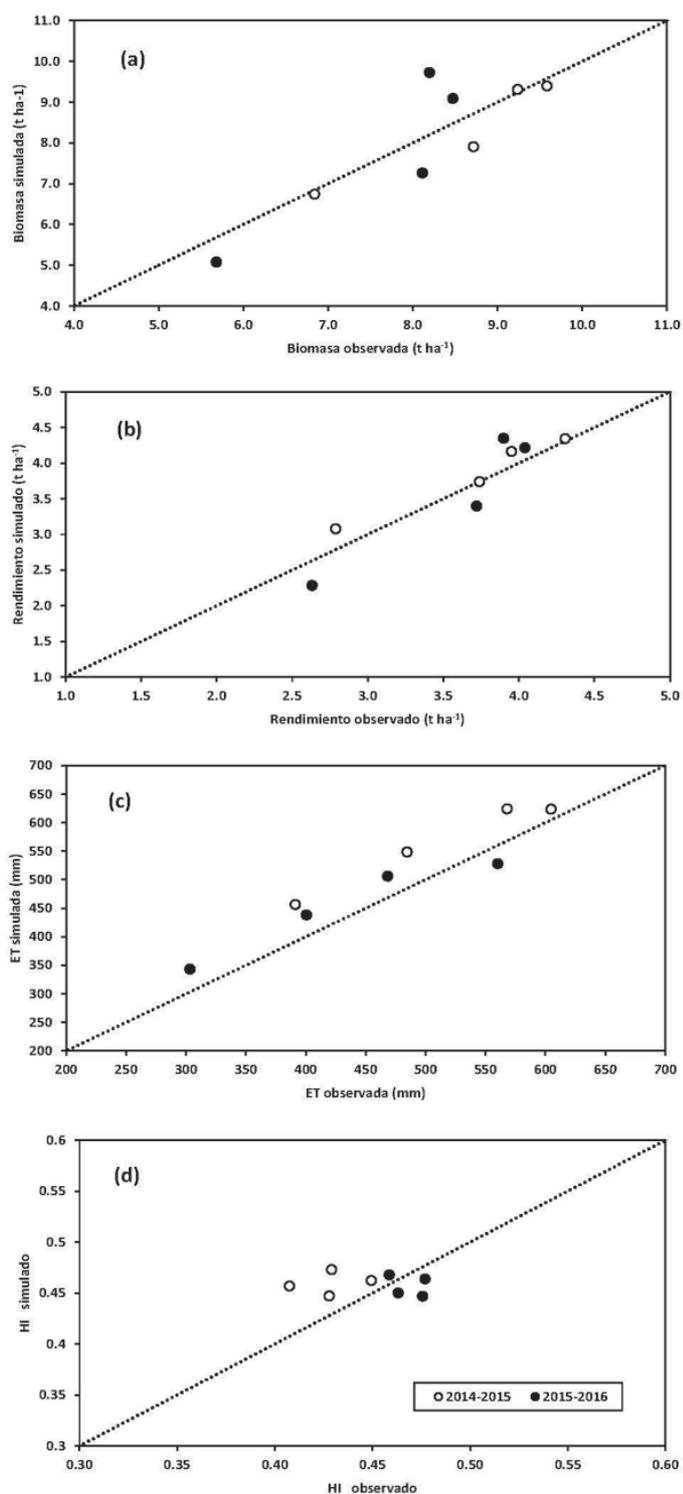
Cuadro 22. Comparación estadística entre los valores observados y simulados de la biomasa final, el rendimiento, la evapotranspiración total de cultivo y el índice de cosecha para la calibración y validación del modelo AquaCrop. La pendiente, la intercepción en el origen y R² son obtenidos de la regresión lineal entre los datos observados y simulados.

	N	Pendiente	Intercepción	R ²	RMSE	IoA
2014-2015						
Biomasa (t ha ⁻¹)	4	0,91	0,67	0,89	0,42	0,96
Rendimiento (t ha ⁻¹)	4	1,22	-0,86	0,96	0,18	0,97
ET (mm)	4	0,82	160,57	0,98	54,6	0,89
HI	4	0,15	0,40	0,05	0,04	0,37
2015-2016						
Biomasa (t ha ⁻¹)	4	1,32	-2,29	0,83	0,98	0,89
Rendimiento (t ha ⁻¹)	4	1,24	-0,91	0,94	0,34	0,94
ET (mm)	4	0,68	183,66	0,87	37,18	0,95
HI	4	-0,34	0,62	0,09	0,02	0,26

N: número de tratamientos; RMSE: raíz del error cuadrático medio (t ha⁻¹, mm o fracción por unidad); IoA: índice de agregación de Willmott (sin dimensión); ET: evapotranspiración del cultivo; HI: índice de cosecha

(Cuadro 22; Fig. 26), donde los coeficientes de determinación de la recta de regresión entre los datos observados y simulados fueron altos ($r^2 > 0,80$), mientras que los errores obtenidos en la estimación de todas las va-

riables fueron bajos, aportando valores elevados. Estos resultados no se observaron con el índice de cosecha, salvo con el RMSE que proporcionaron valores bajos en ambos años.



ET: evapotranspiración del cultivo; HI: índice de cosecha

Figura 26. Biomasa (a), rendimiento (b), evapotranspiración (c) e índice de cosecha (d) observada y simulada de soja en 2014-2015 y 2015-2016.

Los resultados obtenidos en este trabajo, en comparación con otros trabajos realizados (Farahani et al., 2009; García-Vila et al., 2009; Hsiao et al., 2009; García-Vila y Fereres, 2012; Katerji et al., 2013; Abi Saab et al., 2014; Montoya et al., 2016), se pueden considerar aceptables, estimando que la bondad de ajuste de calibración y validación del modelo es satisfactoria.

Estos resultados por sí solos aportan mucho, tanto a la comunidad científica como al sector productivo pero, en cambio, en muchas ocasiones son poco atractivos para el sector productivo si no se llevan a cabo estudios de aplicación. De esta forma, se muestran a modo de ejemplo algunas aplicaciones del modelo.

5.2. Rendimiento de la soja bajo la situación de secano y riego en Salto

Una de las aplicaciones inmediatas del modelo cuando se tiene calibrado el cultivo de soja es el poder conocer cómo se comporta su rendimiento cuando es cultivado bajo situación de secano o de riego. En la figura 27 se puede observar como es la distribu-

ción de rendimientos a lo largo de las 35 campañas de cultivo. Bajo la situación de secano se obtuvo una alta variabilidad en los rendimientos simulados, teniendo valores mínimos de cero hasta valores máximos de 4,2 t ha⁻¹ y cuyo rendimiento promedio fue de 1,69 t ha⁻¹. En general, los rendimientos nulos no es normal que ocurra en el área de estudio, sin embargo, el modelo de crecimiento del cultivo es muy sensible a los contenidos de agua en el suelo durante las primeras fases de desarrollo del cultivo, por lo que un período de déficit hídrico durante los primeros 15 días fue lo que provocó que el cultivo no siguiese su normal desarrollo. Esto ocurrió en 4 de los 35 años utilizados. En la vida real, si es que ocurre algún caso de este tipo o con una merma importante en la densidad de plantas por m², se procede a realizar su resiembra.

Respecto a la situación de riego, la figura 27 evidencia claramente que el aporte de agua complementaria a la lluvia permite una mayor estabilización de los rendimientos, alcanzándose valores promedio de 4,1 t ha⁻¹, con láminas netas de riego promedio aplicadas de 310 mm durante los 35 años de estudio.

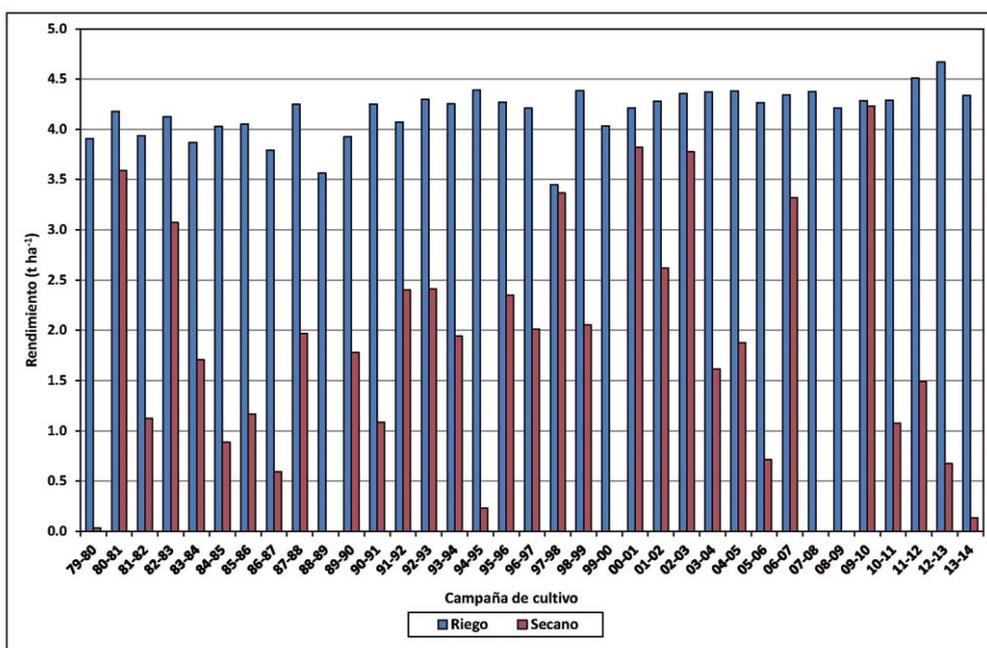


Figura 27. Rendimientos de soja obtenidos en la simulación de 35 años bajo la situación de riego y de secano en Salto.

Como se ha podido analizar, el riego tiene implicancia directa sobre el rendimiento final de la soja, consiguiéndose incrementar la producción final en cerca de un 60 %, además de garantizar la estabilidad de rendimientos en el sistema productivo.

La precipitación media total ocurrida en ambas situaciones fue de 632 mm, mientras que la ET₀ promedio total registrada fue de 750 mm. Si bien ambos datos son próximos y permitiría pensar que la demanda evaporativa en la situación de secano puede ser cubierta en gran parte por la precipitación, es evidente que la variabilidad en la distribución de lluvias así como su intensidad, provoca una falta de predicción de los períodos de déficit hídrico, ocasionando, en la mayoría de los casos, reducciones importantes al rendimiento potencial (Fig. 27).

5.3. Estrategias de gestión de los recursos hídricos en explotaciones agropecuarias bajo riego

Otro posible ejemplo práctico de la utilización de los modelos es la búsqueda de estrategias en la gestión de los recursos hídricos almacenados en una explotación agro-

pecuaria donde se practique el cultivo de soja bajo riego. En este ámbito, se estudió si el efecto del ENSO (El Niño Southern Oscillation) presentó alguna influencia sobre el rendimiento del cultivo, así como en la precipitación, ET₀ y en los requerimientos de riego del cultivo. Este es un aspecto que también ha sido estudiado en otros cultivos de la región como maíz (Beathgen, 1997) y en arroz (Roel y Beathgen, 2005).

Para el caso del cultivo de la soja desarrollado en secano, el rendimiento promedio obtenido fue de 1,297 t ha⁻¹ en los años Niña, 1,505 t ha⁻¹ en los años Normales y 2,261 t ha⁻¹ en los años Niño (Cuadro 22). Si bien se observa que existe un incremento de rendimiento a medida que los años presentan mayor precipitación total en el ciclo, en la clasificación realizada del ciclo ENSO no se observaron diferencias significativas debido a la variabilidad del rendimiento. En cambio, sí que se observaron diferencias significativas para la precipitación y ET₀ total acumulada en el ciclo, donde los años Niña presentan menor precipitación y mayor ET₀, mientras que ocurre lo contrario para los años Niño (Cuadro 23). Para el caso del cultivo desarrollado bajo riego es necesario indicar que no hubo diferencias en el rendi-

Cuadro 23. Distribución de rendimientos, precipitación y ET₀ total estacional, y lámina de riego neta de un cultivo de soja sembrado el 5 de noviembre ante las diferentes fases del ciclo ENSO, bajo la situación de secano y de riego.

Ciclo ENSO	Simulación en secano			Simulación bajo riego	
	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Precipitación estacional (mm)	ET ₀ estacional (mm)	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Lámina de riego neta estacional (mm)
Normal	1,505	525 a	748 ab	4,207	319 b
La Niña	1,297	514 a	781 b	4,185	356 b
El Niño	2,261	873 b	720 a	4,122	252 a
Promedio	1,690	632	750	4,175	307
Std	1,2	288	31	0,3	94
CV (%)	73,9	45,6	4,1	6,0	30,6
p-valor	ns	p<0,05	p<0,05	ns	p<0,05

Std: desviación estándar; CV: coeficiente de variación; ns: no significativo, Medias en las columnas seguidas de diferente letra son significativamente distintas por el test de diferencia de medias de Tukey (p<0,05).

miento simulado para los diferentes años clasificados en el ciclo ENSO, en cambio las láminas de riego estacionales sí que mostraron diferencias significativas, donde los años Niño presentaron menores requerimientos de riego (252 mm) frente a los años Niña (356 mm). Estas diferencias de láminas de riego se deben a la menor precipitación ocurrida.

Por tanto, de forma práctica se tiene información muy valiosa para los gestores de áreas regables sobre la posible distribución de cultivos y los volúmenes de agua de riego en una región, como es Salto, donde existe una alta fiabilidad en la predicción del ciclo ENSO.

5.4. Herramienta de ayuda para el diseño de los sistemas de riego

En el último de los ejemplos se propuso utilizar la información que proporciona el modelo AquaCrop para determinar cuál es la máxima evapotranspiración del cultivo diaria que se produce a lo largo del ciclo durante los 35 años considerados. Este dato es fundamental para el diseño de los sistemas de riego donde es necesario utilizar las **necesidades netas diarias del cultivo**, el cual se consideran prácticamente igual a la **eva-**

potranspiración máxima diaria del cultivo (mm día^{-1}), para poder calcular el caudal que se requiere en el sistema de riego.

De esta forma, los valores de ET máxima simulados en soja por AquaCrop, bajo la situación de riego, fue de entre $7,2 \text{ mm día}^{-1}$ y $9,2 \text{ mm día}^{-1}$ (Fig. 27). Ordenando los valores de ET máxima simulados de menor a mayor en la serie de 35 años simulados, se puede indicar que en cerca del 29 % de los años considerados se tuvo una ET inferior a $7,8 \text{ mm día}^{-1}$ (primer cuartil), un 20 % de los años utilizados presentó valores de ET máxima superior a $8,6 \text{ mm día}^{-1}$ (tercer cuartil), mientras que el 51% de los años restantes tuvieron valores de ET intermedios.

Por tanto, el valor de ET necesario para el diseño de los sistemas de riego (bien sea localizado, aspersión o superficie) con cultivo de soja y bajo las hipótesis planteadas sería de $9,0 \text{ mm día}^{-1}$, el cual cubre más del 97% de los años considerados (Fig. 28). En una rotación de cultivos donde se pretenda practicar el riego, es necesario conocer las **demandas máximas diarias** de todos los cultivos para diseñar el sistema bajo la situación más desfavorable, no siendo recomendable el uso de los valores promedio de ET₀ en los meses de máxima demanda, los cuáles se sitúan entre $5,0$ y $6,0 \text{ mm día}^{-1}$.

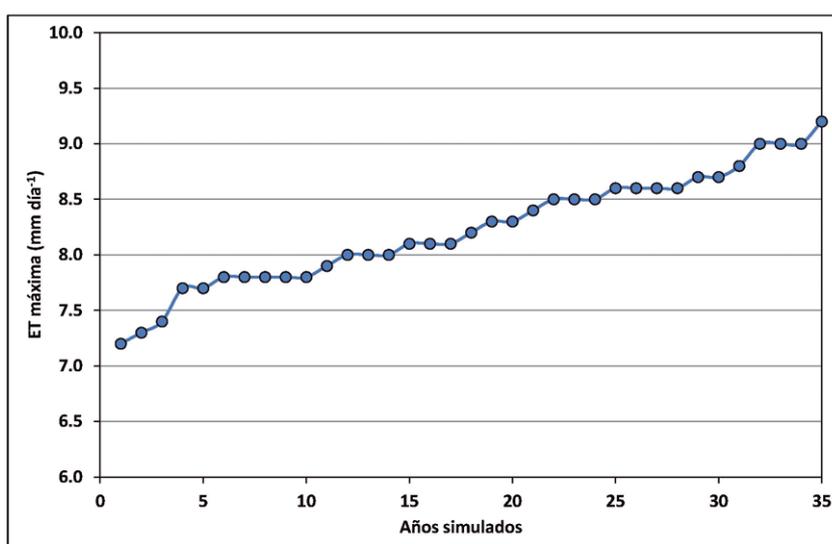


Figura 28. Evapotranspiración máxima diaria simulada por AquaCrop en los 35 años considerados.

6. RESUMEN

En este capítulo se ha estudiado, analizado y aplicado un modelo de simulación de cultivo, en este caso AquaCrop, como herramienta de ayuda en la toma de decisiones de la producción de soja bajo riego. Con este modelo, cuyas características son la sencillez, robustez y precisión, se han mostrado varios aspectos, entre los que se pueden destacar los siguientes:

- Los resultados de la parametrización del modelo con el cultivo de soja, mediante la calibración y validación, han resultado ser aceptables para su aplicación en el área productiva de Salto (Uruguay)
- El riego tiene un efecto claro y directo sobre el incremento de rendimiento del cultivo de soja y la estabilidad productiva del mismo a lo largo de los años. Muestra de ello son los rendimientos alcanzados de la soja, los cuáles se sitúan entre 2 y 3 veces por encima de lo conseguido bajo la situación de secano.
- De cara a la gestión de estrategias de recursos hídricos en explotaciones agropecuarias, se ha observado que el riego amortigua el efecto ENSO sobre el rendimiento del cultivo, proporcionando estabilidad productiva en los sistemas de soja. En cambio, las láminas de riego requeridas por el cultivo son inferiores en los años de El Niño que en los años Normales y de La Niña debido a la mayor precipitación ocurrida. Todo esto proporciona una orientación de requerimientos hídricos del cultivo a gestores de zonas regables.
- El modelo también ha mostrado ser una herramienta válida para el diseño de los sistemas de riego, en cuanto a láminas de riego que debe proporcionar el equipo ante una rotación de cultivos dado.

BIBLIOGRAFÍA

- Abi Saab, M.T., Todorovic, M., Albrizio, R. 2015. Comparing AquaCrop and CropSyst models in simulating barley growth and yield under different water and nitrogen regimes. Does calibration year influence the performance of crop growth models? *Agricultural Water Management*, 147: 21-33.
- Abi Saab, M.T., Albrizio, R., Nangia, V., Karam, F., Rouphael, Y. 2014. Developing scenarios to assess sunflower and soybean yield under different sowing dates and water regimes in the Bekaa valley (Lebanon): Simulations with Aquacrop. *International Journal of Plant Production*, 8: 457-482.
- Allen, R. G. 1990. Software REF-ET. Reference Evapotranspiration Calculator. Utah State University. USA. <https://www.uidaho.edu/cals/kimberly-research-and-extension-center/irrigation-and-water-resources/ref-et-software-request-form>
- Allen, R. G. 2000. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *Journal of Hydrology, Amsterdam*, v. 229, p. 27-41, 2000.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 1998. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Cuadernos de Riego y Drenaje N° 56. 322 p. FAO, Roma, Italia. FAO Irrigation and Drainage. Paper 56. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, Italy. ISSN 0254-5293.
- Allen, R. G., Pereira, L.S., Smith, M., Raes, D., Wright, J. L. 2005. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 131, 2-13.
- Baethgen, W.E. 1998. El Niño and La Niña Impacts in Southeastern South America. In: Review on the causes and consequences of cold events: A la Niña Summit. Proceedings. M. Glantz (ed.) NCAR, Boulder, CO (<http://www.dir.ucar.edu/esig/lanina/>).
- Baker, J.M. and C.H.M. van Bavel. 1987. Measurement of mass flow of water in stems of herbaceous plants. *Plant, Cell, and Environment* 10: 777-782.
- Bergez, J. E., Debaeke, P., Deumier, J. M., Lacroix, B., Leenhardt, D., Leroy, P., y Wallach, D. 2001. MODERATO: an object-oriented decision tool for designing maize irrigation schedules. *Ecological modelling* 137(1), 43-60.
- Bidegain, M. y R.M. Caffera. 1997. Depto. de Meteorología, Facultad de Ciencias, Udelar. Uruguay. http://www.rau.edu.uy/uruguay/geografia/Uy_c-info.htm. Último acceso 13 de julio de 2016.
- Bos, M.G., Burton, M.A. Molden, D.J. 2005. Irrigation and drainage performance assessment. Practical Guidelines. CABI Publishing. Cambridge.USA. 158 pp.
- Brouwer, C., K. Prins, M. Heibloem. 1989. Irrigation Water Management: Irrigation Scheduling. Training manual n°4. FAO. Land and Water Development Division. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Campbell, G. S. and M. D. Campbell. 1982. Irrigation scheduling using soil moisture measurements: theory and practice. *Advances in irrigation* 1.1: 25-42.
- Castro, José L. 1974. Sistemas de Producción del Centro de Investigaciones Agrícolas «Alberto Boerger». Centro de investigaciones Agrícolas «Alberto Boerger». MGAP. Uruguay.
- Èermak J, Jenik J, Kucera J, ZidekV. 1984. Xylem water flow in a crack willow tree (*Saiix fragilis* L.) in relation to diurnal changes of environment. *Oecologia* 64, 145-51.

- CONEAT. 1979. Grupos de suelos CONEAT. Índices de productividad. Comisión Nacional de Estudio Agroeconómico de la Tierra, Ministerio de Agricultura y Pesca. CONEAT-MAP. Montevideo: 167 pp. <http://www.prenader.gub.uy/coneat>
- CPC. 2016. El Niño/Sourthen Oscilation. Diagnostic Discussion. Climate Prediction Center. On line: http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensodisc_oct2016/ensodisc.shtml
- DeJonge K.C, Taghvaeian S., Trout T. J., Comas L. H. 2015. Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize. *Agricultural Water Management* 156 (2015) 51–62.
- Durán, A. y F. García Prechac. 2007. Suelos del Uruguay. Origen, clasificación, manejo y conservación. Vol 1. Ed. Hemisferio Sur. Montevideo. Uruguay. 334 pp.
- Evelt, S.R., Howell, T.A., Schneider, A.D., Wanjura, D.F., Upchurch, D.R. 2002. Automatic drip irrigation control regulates water use efficiency. *Int. Water Irrig.* 22, 32–37.
- Failde, A; Peixoto, C; Estol, E; Preve, A. 2013. Estudio sobre riego agropecuario en Uruguay. FAO – Red Mercosur de Investigaciones Económicas. Montevideo. Uruguay.
- 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.
- García Petillo, M. 2010. Análisis crítico del método de riego por goteo en las condiciones del Uruguay. *Agrociencia Uruguay*. Vol 14 1: 36 – 43.
- García Petillo, M. y J. R. Castel. 2007. Water balance and crop coefficient estimation of a citrus orchard in Uruguay. *Spanish Journal of Agricultural Research* 2007 5(2).
- García-Vila, M., Fereres, E., Mateos, L., Orgaz, F., Steduto, P. 2009. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. *Agron. J.* 101, 477–487.
- García-Vila, M., Fereres, E. 2012. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *Eur. J. Agron.* 36, 21–31.
- Giménez, L.; M. García Petillo. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*. Vol 15 2:100-108.
- Giménez, L., Petillo, M. G., Paredes, P., & Pereira, L. S. 2016. Predicting Maize Transpiration, Water Use and Productivity for Developing Improved Supplemental Irrigation Schedules in Western Uruguay to Cope with Climate Variability. *Water*, 8(7), 309.
- Goldhamer DA, Fereres E, Mata M, Girona J, Cohen M. 1999. Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water stress monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. *J Am Soc Hortic Sci* 124(4):437–444
- Granier A. 1985. Une nouvelle methode pour la mesure du flux de seve brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestieres* 42, 193-200.
- Grupo de Desarrollo del Riego (GDR). 2009. Riego suplementario en sistemas agrícolas, lecheros y ganaderos intensivos en Uruguay. MGAP. 2009.
- Ha, W., Gowda, P. H., & Howell, T. A. 2013. A review of downscaling methods for remote sensing-based irrigation management: Part I. *Irrigation Science*, 31(4), 831-850.
- Hochman, Z. P.S. Carberryb, M.J. Robertsonc, D.S. Gaydond, L.W. Bell b, y P.C. McIntoshe. 2013. Prospects for ecological intensification of Australian agriculture. *Europ. J. Agronomy* 44: 109–123.
- Hsiao, T.C. Steduto, P., Fereres, E. 2007. A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture. *Irrigation Science*, 25: 209-231.
- Idso, S.B. 1982. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agr. Meteorol.* 27, 59–70.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter Jr., P.J., Reginato, R.J., Hatfield, J.L. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agr. Meteorol.* 24, 45–55.
- INIA GRAS. 2015. Base de datos climáticos de las estaciones experimentales de INIA. <http://www.inia.org.uy/online/site/gras.php>. Ultimo acceso febrero 2016.

- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., Pinter, P.J. 1981. Canopy temperature as a cropwater stress indicator. *Water Resour. Res.* 17, 1133–1138.
- Jones, H. G. 1999. Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agriculture and Forest Meteorology*, 95(3), 139–149.
- Jones, H. G., Stoll, M., Santos, T., de Sousa, C., Chaves, M. M., y Grant, O. M. 2002. Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: Application to grapevine. *Journal of Experimental Botany*, 53(378), 2249–2260.
- Jones, H.G.; Leinonen, I. 2003. Thermal Imaging for the study of plant water relations. *Journal of Agriculture Meteorology*, 59 (3), 205-217.
- Katerji, N., Campi, P., Mastrorilli, M. 2013. Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. *Agric. Water Manage.* 130, 14–26.
- McKerron, D.K.L. 2007. Mathematical models of plant growth and development. In: D. Vreugdenhil, J. Bradshaw, C. Gebhardt, F. Govers, D.K.L. MacKerron, M.A. Taylor, H.A. Ross (Eds.). *Potato Biology and Biotechnology Advances and Perspectives*, 753-776, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Molfino, J.H. y A. Califra. 2001. Agua Disponible de las Tierras del Uruguay. Segunda Aproximación. División Suelos y Aguas. Dirección General de Recursos Naturales Renovables Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Uruguay.
- Molfino, J.H. 2009. Estimación del Agua Disponible en los grupos CONEAT. Metodología empleada. Montevideo. Uruguay.
- Montoya, F., Camargo, D., Ortega, F., Córcoles, J.I., Domínguez, A. 2016. Evaluation of Aquacrop model for a potato crop under different irrigation conditions. *Agricultural Water Management* 164: 267-280.
- Morales, P., García, M., García, C., Beretta, A., Moreno, G., Camio, G. 2014. Pivotes en Uruguay. Evaluación de su funcionamiento. In: Riego en cultivos y pasturas. 3ª Seminario Internacional. pp. 66-77. Paysandú, Uruguay.
- NCRS, 2004. Estimation of direct runoff from storm rainfall, natural resources conservation Service. In: Part 630 Hydrology. National Engineering Handbook. United States Department of Agriculture.
- O'Shaughnessy, S. A., Evett, S. R., Colaizzi, P. D., & Howell, T. A. 2012. A crop water stress index and time threshold for automatic irrigation scheduling of grain sorghum. *Agricultural water management*, 107, 122-132.
- Otero, A.; C. Goñi. 2010. Ajuste del Balance Hídrico utilizando el Modelo WinISAREG. III Simposio en Investigación y Desarrollo Tecnológico en Citrus. Salto. Salto. Uruguay. Noviembre, 2010
- Paredes, P., Wei, Z., Liu, Y., Xu, D., Xin, Y., Zhang, B., Pereira, L.S. 2015. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water, soil evaporation, biomass and yield of soybeans in North China Plain. *Agricultural Water Management*, 152: 57-71.
- Pereira, L. S.; Teodoro, P. R.; Rodrigues, P. N.; Teixeira J. L. 2003. Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG. In: Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions (Rossi G; Cancelliere A; Pereira L S; Oweis T; Shatanawi M; Zairi A, Eds) pp 161–180. Kluwer, Dordrecht)
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E. 2009. AquaCrop. The FAO crop model to simulate yield response to water: II: main algorithms and software description. *Agron. J.* 101, 438–447.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E. 2012. AquaCrop Reference Manual, AquaCrop version 4.0 Website: <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>.
- Roel, A., Baethgen, W.E. 2005. Asociación entre las fases de «El Niño» y la producción arrocerá del Uruguay. Serie técnica 148.
- Rolim J., Godinho P., Sequeira B., Rosa R., Paredes P. and Pereira L.S. 2006. SIMDualKc, A Software Tool for Water Balance Simulation Based on Dual Crop Coefficient. In: Computers in Agriculture and Natural Resources, 4th World Congress Conference, Proceedings of the 24-26 July 2006 (Orlando, Florida USA) doi:10.13031/2013.21973

- Saxton, K.E., Rawls, W., Romberger, J.S., Papendick, R.I. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society American Journal*, 50: 1031-1036.
- Shaw, E. M., 1994. *Hydrology in Practice*. 3rd Edition. Chapman & Hill Press, London, UK, 569 pp.
- Sholander, P.F., Hammel, H.T. Bradstreet, E.D. Hemmingsen, E.A. 1965. Sap pressure in vascular plants. *Science* 148:339-346.
- Silva, A.; Ponce de León, J.; García, F.; Durán, A. 1988. Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua en los suelos del Uruguay, Facultad de Agronomía, Montevideo, Uruguay. *Boletín de Investigación* N° 10.
- Smith, M. 1992. CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management. Food & Agriculture Org.
- 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. *Agricultural and Forest Meteorology*, 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. *Agronomy Journal*, 101: 426-437.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., Raes, D. 2012. Crop yield response to water. *FAO Irrig Drain*. pp. 66.
- Steinberg SL, van Bavel CHM, McFarland MJ. 1989. A gauge to measure mass flow rate of sap in stems and trunks of woody plants. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 114, 466-72.
- Swanson RH. 1994. Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees. *Agricultural and Forest Meteorology* 72, 113-32.
- Terzaghi, A.; Sganga, J.C. 1998. Características físicas de los principales suelos agrícolas de Canelones y Montevideo, su interpretación agronómica. 2^a. ed. Montevideo, Uruguay. Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. 61 p. (Boletín Técnico n° 8).
- Thyssen, I. y Detlefsen, N. K. 2006. Online decision support for irrigation for farmers. *Agricultural Water Management* 86(3), 269-276.
- USDA. 2006. Keys to Soil Taxonomy. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Vanuytrech, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., Heng, L.K., García-Vila, M., Mejías-Moreno, P. 2014. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling & Software*, 62: 351-360.
- van Ittersum, M.K.; K.G. Cassman; P. Grassini; J. Wolf; P. Tittonell y Z. Hochman. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance – A review. *Field Crop Research* 143:4-17.
- Victoria, C.D.; Kacevas, A.; Fiori, H. 2000. Caracterización de suelos por erodabilidad e infiltración con técnicas de lluvia simulada. Proyecto No. 45. In: Seminario Investigación Aplicada (2000, Las Brujas, Canelones, UY). Montevideo, Uruguay, INIA.
- Willmott, C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 63, 1309–1313.
- Zamalvide, J.; L. Rovira; A. Califra; C. Moltini; D. Macías; A. Formento y O. Casanova. 2001. Calidad de aguas para riego en producciones hortícolas y frutícolas. Informe PRENADER. MGPA-RENARE. Uruguay.
- Zhang, Y. y Feng, L. 2009. CropIrr: A decision support system for crop irrigation management. pp. 90-97. Springer.

ANEXOS

ANEXO 1. Características físicas y propiedades hídricas de los principales suelos utilizados en la modelación. Adaptado de J.H. Molfino (2009).

SUELOS DOMINANTES	Grupo CONEAT	Perfil	Horiz	Espesor (cm)	Ar %	L %	Ac %	C %	Materia orgánica	Capacidad de campo (1)	Punto Marchitez Permanente (2)	Agua disponible (Hp%)	Densidad aparente	Agua disp en horizonte (mm)
SALTO														
Brunosoles/Argisoles	9.6	USDA 4	A	27	80,5	6,5	13	1,4	2,4	16,4	5,4	11,0	1,4	42,2
	9.6		B	38	70,9	5,8	23,3	0,8	1,4	19,1	9,1	10,0	1,5	55,6
Vertisoles/Brunosoles	12.11	USDA 5	A	32	8,8	38,6	52,6	4,8	8,3	48,7	26,0	22,7	1,0	73,0
	12.11		B	45	9,3	31,6	59,1	2,9	5,0	44,4	26,9	17,4	1,2	93,0
Brunosoles/Argisoles	S10.21	O05-03	A	24	12,4	56,4	31,2	2,3	4,0	34,2	17,0	17,2	1,2	50,5
	S10.21		B	38	9,8	40,6	49,6	1,2	2,1	35,9	22,6	13,2	1,3	67,1
TREINTA Y TRES														
Brunosoles Lúvicos	2.21	F23-01	A	32	31	44	25	2,95	5,1	33,2	14,0	19,2	1,2	73,4
Argisoles Subeútricos Melánicos Abrupticos	2.21		B	33	22,9	40,1	37	1,84	3,2	32,6	17,9	14,8	1,3	62,9
Planosoles Dútricos Ocrícos	4.1	D20-54	A	33	51,4	30,9	17,7	1,39	2,4	21,8	9,1	12,8	1,4	57,7
	4.1		B	38	31	24,6	44,4	0,78	1,3	30,3	19,1	11,2	1,4	59,9
Brunosoles Subeútricos Lúvicos	10.7	F29-20	A	24	19,9	56,7	23,4	1,75	3,0	29,5	13,5	16,0	1,3	49,2
Argisoles Subeútricos Melánicos Abrupticos	10.7		B	38	12,1	42,6	45,3	1,15	2,0	34,1	21,0	13,1	1,3	66,9
COLONIA														
Brunosoles Eútricos Lúvicos	10.3	M25-05	A	28	27,7	49,4	22,8	3,9	6,7	37,7	14,0	23,7	1,1	73,1
	10.3		B	29	18,1	35,8	46,1	1,6	2,8	35,1	21,1	14,0	1,3	53,2
Vertisoles Rúpticos Típicos y Lúvicos	10.8 b	USDA 1	A	35	13,8	43,2	43	3,96	6,8	42,9	21,9	21,0	1,1	79,6
Brunosoles Eútricos y Subeútricos Típicos	10.8 b		B	40	14,1	41,4	44,5	1,37	2,4	34,4	20,7	13,7	1,3	72,3
Brunosoles Subeútricos, a veces Eútricos, Típicos	11.7	USDA 15	A	27	27	47,4	25,6	3,2	5,5	35,0	14,6	20,4	1,2	64,2
	11.7		B	45	17,9	33,3	48,8	1,6	2,8	35,9	22,0	13,9	1,3	82,1
CANELONES														
Brunosoles Subeútricos	10.6 a	L28-03	A	26	24,5	48,5	27	2,63	4,5	33,1	14,9	18,2	1,2	57,4
	10.6 a		B	39	14,7	38	47,3	1,1	1,9	34,2	21,4	12,8	1,4	67,4
Vertisoles Rúpticos Típicos y Lúvicos	10.8 a	J27-12	A	19	14,3	55,5	30,2	1,9	3,3	31,9	16,3	15,7	1,3	37,7
	10.8 a		B	46	11	43	46	0,8	1,4	33,3	21,1	12,2	1,4	77,1
Brunosoles Subeútricos, a veces Eútricos, Típicos, a veces Lúvicos	11.9	USDA 15	A	36	9,2	53,6	37,2	2,6	4,5	36,8	19,4	17,4	1,2	74,9
	11.9		B	43	6,8	49	44,2	1,2	2,1	34,6	21,0	13,6	1,3	77,5

Valores expresados en contenido en peso de agua (Hp%). (1) Capacidad de campo (0,03 MPa); (2) Punto de marchitez permanente (1,5 MPa); (3) Agua disponible (Hp%).

ANEXO 2a. Fechas promedio de las diferentes etapas fenológicas de los cultivos usadas en la modelación.

Canelones													
Etapas	Alfalfa			Festuca			Maíz			Cosecha			
	Fecha de Corte	Profundidad radicular (m)	P	Kc	Fecha de Corte	Profundidad radicular (m)	P	Kc	Etapa	Maíz Ciclo Medio	Profundidad radicular (m)	P	Kc
1° Corte	29-Jun	0,4	0,5	0,4	15-Ago	0,4	0,5	0,95	Siembra	07-Oct	0,2	0,5	0,35
2° Corte	30-Sep	0,4	0,5	0,4	30-Sep	0,4	0,5	0,95	Crecimiento Vegetativo	01-Nov	0,2	0,5	0,35
3° Corte	01-Nov	0,4	0,5	0,4	02-Nov	0,4	0,5	1,05	Floración	01-Ene	0,5	0,3	1,2
4° Corte	01-Dic	0,4	0,25	0,95	15-Dic	0,4	0,5	1,05	Formación del Rendimiento	20-Ene	0,5	0,3	1,2
5° Corte	15-Ene	0,4	0,25	0,9	01-Feb	0,4	0,5	1,00	Comienzo de Senescencia	25-Feb	0,5	0,4	0,6
6° Corte	01-Mar	0,4	0,5	0,9	29-Mar	0,4	0,5	1,00	Cosecha	15-Mar	0,5	0,5	0,6

Canelones																
Etapas	Durazno Temprano			Durazno Estación			Pera			Manzano						
	Fecha de Corte	Profundidad radicular (m)	P	Kc	Fecha de Corte	Profundidad radicular (m)	P	Kc	Etapa	Profundidad radicular (m)	P	Kc	Manzano	Profundidad radicular (m)	P	Kc
Plena Floración	05-Ago	0,40	0,50	0,80	07-set	0,40	0,50	0,80	07-Oct	0,40	0,50	0,45	07-Oct	0,40	0,50	0,80
Inicio crecimiento vegetativo	20-Ago	0,40	0,50	0,80	20-set	0,40	0,50	0,80	07-Oct	0,40	0,50	0,45	07-Oct	0,40	0,50	0,80
Follaje completo	15-Oct	0,40	0,25	0,90	01-Nov	0,40	0,25	0,90	10-Nov	0,40	0,40	0,95	30-Nov	0,40	0,40	0,95
Cosecha	20-Nov	0,40	0,25	0,90	15-Ene	0,40	0,25	0,90	01-Feb	0,40	0,50	0,95	01-Mar	0,40	0,50	0,95
Fin de riego	01-Mar	0,40	0,50	0,75	15-Mar	0,40	0,50	0,75	30-Mar	0,40	0,70	0,75	01-Abr	0,40	0,70	0,75

ANEXO 2 b. Fechas promedio de las diferentes etapas fenológicas de los cultivos usadas en la modelación.

Colonia																
Etapas	Maíz Corto			Maíz Medio			Soja 4			Soja 5-6			Soja 7-8			
	Fecha de Corte	Profundidad radicular (m)	P	Kc	Fecha de Corte	Profundidad radicular (m)	P	Kc	Fecha de Corte	Profundidad radicular (m)	P	Kc	Fecha de Corte	Profundidad radicular (m)	P	Kc
Siembra	01-Oct	0,2	0,5	0,35	01-Oct	0,2	0,5	0,35	28-Oct	0,2	0,5	0,5	28-Oct	0,15	0,5	0,5
Crecimiento Vegetativo	08-Oct	0,2	0,5	0,35	08-Oct	0,2	0,5	0,35	05-Nov	0,2	0,5	0,5	07-Nov	0,3	0,5	0,5
Floración	15-Dic	0,5	0,4	1,2	20-Dic	0,5	0,4	1,2	16-Dic	0,4	0,5	1,15	05-Ene	0,4	0,5	1,15
Formación del Rendimiento	04-Ene	0,5	0,3	1,2	10-Ene	0,5	0,3	1,2	23-Dic	0,4	0,5	1,15	03-Feb	0,4	0,5	1,15
Comienzo de Senescencia	08-Feb	0,5	0,4	0,6	18-Feb	0,5	0,4	0,6	22-Mar	0,4	0,75	0,75	28-Mar	0,4	0,75	0,75
Cosecha	04-Mar	0,5	0,5	0,5	19-Mar	0,5	0,5	0,5	30-Mar	0,4	0,75	0,75	21-Abr	0,4	0,75	0,75

Colonia						
Etapas	Alfalfa		Festuca		Kc	P
	Fecha de Corte	Profundidad radicular (m)	Fecha de Corte	Profundidad radicular (m)		
1° Corte	29-Jun	0,4	15-Ago	0,4	0,4	0,95
2° Corte	30-Sep	0,4	30-Sep	0,4	0,5	1,05
3° Corte	01-Nov	0,4	02-Nov	0,4	0,5	1,05
4° Corte	01-Dic	0,4	15-Dic	0,4	0,5	1,00
5° Corte	15-Ene	0,4	01-Feb	0,4	0,5	1,00
6° Corte	01-Mar	0,4	29-Mar	0,4	0,5	1,00

ANEXO 2c. Fechas promedio de las diferentes etapas fenológicas de los cultivos usadas en la modelación.

Salto																						
Etapa	Alfalfa Fecha de Corte	Profundidad radicular (m)	P	Kc	Festuca Fecha de Corte	Profundidad radicular (m)	P	Kc	Maiz Medio	Profundidad radicular (m)	P	Kc	Soja 5-6	Prof.	P	Kc	Etapa	Citricos (Navel)	Prof	P	Kc	
1° Corte	29-Jun	0,4	0,5	0,4	15-Ago	0,4	0,5	0,95	Siembra	01-Oct	0,2	0,5	0,35	01-Oct	0,2	0,5	0,5	Inicio Crecimiento Vegetativo	20-Ago	0,4	0,33	0,95
2° Corte	30-Sep	0,4	0,5	0,4	30-Sep	0,4	0,5	0,4	Crecimiento Vegetativo	08-Oct	0,2	0,5	0,4	10-Oct	0,2	0,5	0,5	Floración	24-set	0,4	0,33	0,7
3° Corte	01-Nov	0,4	0,5	0,4	02-Nov	0,4	0,5	1,05	Floración	20-Dic	0,5	0,4	1,2	11-Dic	0,4	0,5	1,15	Cuajado de fruto	01-Oct	0,4	0,33	0,7
4° Corte	01-Dic	0,4	0,25	0,95	15-Dic	0,4	0,5	1,00	Formación del Rendimiento	10-Ene	0,5	0,3	0,6	15-Ene	0,4	0,5	0,75	Fin de riego	01-Abr	0,4	0,33	0,95
5° Corte	15-Ene	0,4	0,25	0,9	01-Feb	0,4	0,5	1,00	Comienzo de Senescencia	10-Feb	0,5	0,4	0,6	01-Mar	0,4	0,75	0,75	Cosecha	10-May	0,4	0,33	0,95
6° Corte	01-Mar	0,4	0,5	0,5	29-Mar	0,4	0,5	0,5	Cosecha	04-Mar	0,5	0,5	0,5	10-Mar	0,4	0,75	0,75					

Treinta y Tres																		
Etapa	Alfalfa Fecha de Corte	Profundidad radicular (m)	P	Kc	Festuca Fecha de Corte	Profundidad radicular (m)	P	Kc	Maiz Medio	Prof.	P	Kc	Soja 5-6	Prof.	P	Kc	Etapa	
1° Corte	29-Jun	0,4	0,5	0,4	15-Ago	0,2	0,5	0,35	Siembra	07-Oct	0,2	0,5	0,35	01-Nov	0,2	0,5	0,5	Crecimiento Vegetativo
2° Corte	30-Sep	0,4	0,5	0,4	30-set	0,2	0,5	0,4	Crecimiento Vegetativo	14-Oct	0,25	0,5	0,4	17-Nov	0,2	0,5	0,5	Floración
3° Corte	01-Nov	0,4	0,5	0,95	10-Nov	0,5	0,4	1,2	Floración	23-Dic	0,5	0,4	1,25	31-Dic	0,4	0,5	1,15	Formación del Rendimiento
4° Corte	01-Dic	0,4	0,25	0,9	15-Dic	0,5	0,3	0,6	Formación del Rendimiento	12-Ene	0,5	0,3	0,6	26-Ene	0,4	0,5	0,75	Comienzo de Senescencia
5° Corte	15-Ene	0,4	0,25	0,9	01-Feb	0,5	0,4	0,6	Comienzo de Senescencia	13-Feb	0,5	0,4	0,75	30-Mar	0,4	0,75	0,75	Cosecha
6° Corte	01-Mar	0,4	0,5	0,5	29-Mar	0,5	0,5	0,5	Cosecha	04-Mar	0,5	0,5	0,5	25-Abr	0,4	0,75	0,75	

Impreso por Editorial Hemisferio Sur S.R.L.
Buenos Aires 335
Montevideo - Uruguay

Depósito Legal 369-602/17

INIA Dirección Nacional

Andes 1365, P. 12
Montevideo
Tel.: 598 2902 0550
Fax: 598 2902 3633
iniadn@dn.inia.org.uy

INIA La Estanzuela

Ruta 50, Km 11
Colonia
Tel.: 598 4574 8000
Fax: 598 4574 8012
iniale@le.inia.org.uy

INIA Las Brujas

Ruta 48, Km 10
Canelones
Tel.: 598 2367 7641
Fax: 598 2367 7609
inia_lb@lb.inia.org.uy

INIA Salto Grande

Camino al Terrible
Salto
Tel.: 598 4733 5156
Fax: 598 4732 9624
inia_sg@sg.inia.org.uy

INIA Tacuarembó

Ruta 5, Km 386
Tacuarembó
Tel.: 598 4632 2407
Fax: 598 4632 3969
iniatbo@tb.inia.org.uy

INIA Treinta y Tres

Ruta 8, Km 281
Treinta y Tres
Tel.: 598 4452 2023
Fax: 598 4452 5701
iniatt@tyt.inia.org.uy

www.inia.uy