



# Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas

1<sup>er</sup> Seminario Internacional / Paysandú / Uruguay  
Agosto, 2010



# Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas

---

1er Seminario Internacional / Paysandú / Uruguay  
Agosto, 2010



© Instituto Nacional de Investigación Agropecuario de Uruguay. 2010

El uso de la información que contiene el documento está sujeto a que sea citado apropiadamente cuando corresponda.

Esta publicación también está disponible en formato electrónico (PDF) en el sitio Web institucional en <http://www.inia.org.uy>

Coordinación editorial: Grupo de Desarrollo de Riego  
Corrección de estilo: Malvina Galván  
Diseño de portada y diagramación: Esteban Grille  
Imprenta: Boscana

Potencial del riesgo extensivo cultivos y pasturas.  
Montevideo: INIA, 2010  
208p., 18.7 x 26.5 cm.

ISBN 978-9974-38-296-1

Montevideo, Uruguay - 2010

**E**l Seminario Internacional “Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas”, es una iniciativa que procura mejorar el intercambio de conocimientos entre profesionales vinculados al sector agropecuario, investigadores, autoridades, empresarios y estudiantes; sobre una tecnología que presenta grandes posibilidades de aportar al crecimiento económico y social del sector agropecuario.

El Grupo de Desarrollo del Riego (GDR), que lideró la planificación de este evento, es una organización integrada por instituciones públicas y empresas privadas que tienen como objetivo aportar elementos que ayuden a viabilizar la adopción del riego suplementario tecnificado en los sistemas de producción extensivos.

A nivel mundial, los países y regiones, que han desarrollado ampliamente la tecnología de riego, presentan generalmente climas áridos y semi-áridos. En esas condiciones, el volumen de las precipitaciones es insuficiente para llenar los requerimientos de los cultivos, por lo tanto se requiere de riego permanente en las diferentes situaciones de producción. El Seminario recopila algunas experiencias, a través de las ponencias de expertos dedicados al riego en dichos países, que son altamente apreciables.

El Uruguay presenta un clima templado y húmedo, sin embargo el potencial físico y económico de los sistemas de producción agrícolas y forrajeros es altamente dependiente del comportamiento de las precipitaciones. Durante el verano, el contenido de agua disponible de los suelos, en general, no satisface la demanda hídrica de los cultivos y las pasturas.

La baja capacidad de almacenaje de agua de los suelos en relación a las necesidades de agua de los cultivos, conjuntamente con la variabilidad del régimen de lluvias provoca que las deficiencias hídricas más o menos prolongadas sean un fenómeno corriente. A esto se suma un gradual aumento de la frecuencia de eventos extremos tanto por la incidencia del cambio climático global, como por la identificación de una mayor variación en las precipitaciones, los cuales generan deficiencias hídricas severas y comprometen seriamente la producción, incrementando los costos económicos de las medidas de mitigación e impactando fuertemente en aspectos productivos, económicos y sociales.

El país asiste a un nuevo escenario en sus sistemas de producción extensivos, características como: el aumento en el precio de la tierra, el incremento en la superficie de siembra de cultivos y la alta presión en el uso de la tierra; ha generado cambios estructurales. La competencia entre los diferentes rubros provoca, entre otros factores, un proceso de intensificación en la agricultura, la lechería y la ganadería, y por ende en la demanda de agua de los sistemas productivos.

El desarrollo del riego suplementario en cultivos y pasturas concebido como una herramienta integral dentro de los sistemas de producción, posibilitará disminuir la vulnerabilidad de los mismos y explorar potenciales de rendimientos en granos

y forrajes, mejorando la eficiencia en el uso del agua y generando fuentes de trabajo genuinas en el sector agropecuario.

La mayor entrada de Carbono en los sistemas agrícolas y pastoriles diseñados bajo riego y la concepción de riego suplementario tecnificado, permitirá aportar a la sustentabilidad de los sistemas de producción y al cuidado y la conservación de los recursos naturales.

Las instituciones organizadoras del Seminario Internacional “Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas” desean agradecer a las empresas: YALFIN S.A., CIBELES, Banco de Seguros del Estado, REINKE, IRRISYSTEMS S.A., AISCO, IRRIGATION Management Uruguay S.A., AGRITEC S.A., SAMAN, TIGRE Uruguay, ITT FLIGHT Uruguay, SPC Consultores, LAGE y Cía. S.A., RUTILAN S.A. Y TIMAC Agro Uruguay por su colaboración, la cual hizo posible la realización del evento.

Así como a la Unidad de Difusión de la EEMAC por los trabajos en la organización y difusión, a los becarios de investigación del GTI Agricultura de la Facultad de Agronomía por la colaboración en los trabajos administrativos, a la Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología de INIA por la difusión realizada, a la Red Iberoamericana de Riegos por la difusión internacional, a la Fundación “Dr. Eduardo Acevedo” por las tareas de inscripción y al Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca por declarar al evento de interés Ministerial.

## **Grupo de Desarrollo del Riego**

**GTI Agricultura de Facultad de Agronomía**

**Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria**

**PROCISUR**

## **COMITÉ ORGANIZADOR**

Ing. Agr. (MSc) Luis Giménez (Facultad de Agronomía)

Ing. Agr. Bernardo Böcking (Grupo de Desarrollo del Riego)

Dr. Ing. Agr. Mario García Petillo (Facultad de Agronomía)

Dr. Ing. Agr. Claudio García (INIA)

Ing. Agr. (PhD) Jorge Sawchik (INIA)

# Contenido

1. El Riego en un clima cambiante .....	7
<i>W. E. Baethgen y R.Terra</i>	
2. Funcionalidad de raíces y agua del subsuelo: su rol en la optimización del riego suplementario .....	19
<i>J. Dardanelli, I. Severina y J. Andriani</i>	
3. Efectos de la disponibilidad hídrica en diferentes etapas de desarrollo de maíz y soja .....	29
<i>L.Giménez</i>	
4. Riego suplementario en cultivos extensivos, panorama de Argentina y experiencia en la región central del país .....	39
<i>I. A. Salinas</i>	
5. Riego mecanizado: ensayos de uniformidad y eficiencia de los diferentes tipos de emisores .....	49
<i>J.N. Ortíz; J.A. de Juan y J.M. Tarjuelo</i>	
6. ¿Por qué no regar por gravedad?.....	67
<i>M. García Petillo</i>	
7. Necesidades de agua e de rega das culturas: uso de modelos .....	73
<i>L. S. Pereira</i>	
8. Efecto de la uniformidad de riego en el rendimiento económico de un cultivo .....	91
<i>E. López-Mata, J.M. Tarjuelo, J.A. de Juan, R. Ballesteros, A. Domínguez</i>	
9. Manejo del riego y asesoramiento al regante: riego suplementario y siembra directa .....	103
<i>R. Carlesso</i>	
10. Manejo del agua en arroz: conservación y uso eficiente.....	115
<i>G.Cantou, Á.Roel, A.Lavecchia y C. García</i>	
11. Riego en agroenergía predial .....	125
<i>J.P. Carnelli</i>	
12. Estrategias para la incorporación del riego en sistemas de producción extensivos .....	135
<i>C. García</i>	
13. Riego Suplementario en pasturas: antecedentes de investigación nacional .....	141
<i>J. Sawchik, C. Mas, E. Pérez Gomar, R. Bermúdez, V. Pravia, D. Giorello, W. Ayala</i>	
14. Rol del riego en sistemas pastoriles de producción de leche: ruta de intensificación o estabilizador del sistema .....	155
<i>P.Chilibroste, J. Artagaveytia, y G. Giudice</i>	
15. ¿Es viable económicamente el riego extensivo en Uruguay? .....	165
<i>L. Piedrabuena</i>	
16. Disponibilidad de agua en Uruguay: Variabilidad – Predicción – Institucionalidad .....	177
<i>J. L. Genta y N. Failache</i>	
17. Riego extensivo, experiencia comercial .....	183
<i>B. Böcking y S. Bandeira</i>	
Bibliografía .....	193



# 1. El Riego en un clima cambiante

*W. E. Baethgen y R. Terra*

**Walter E. Baethgen:** Director, Programa Regional para América Latina y el Caribe International Research Institute for Climate and Society (IRI)- The Earth Institute at Columbia University. Contacto: [baethgen@iri.columbia.edu](mailto:baethgen@iri.columbia.edu)

**Rafael Terra:** Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) Facultad de Ingeniería - Universidad de la República, Uruguay. Contacto: [rterra@fing.edu.uy](mailto:rterra@fing.edu.uy)

## 1.1. Introducción

La utilización de combustibles fósiles y los cambios en el uso de la tierra han venido resultando en un aumento en la concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la atmósfera. La concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> ha incrementado de unas 280 ppm, en la etapa preindustrial, a 388 ppm actualmente. El CO<sub>2</sub> es un Gas de Efecto Invernadero (GEI) que naturalmente contribuye a mantener la temperatura de superficie de la tierra varios grados por encima de lo que estaría en su ausencia, debido a su capacidad de absorber y emitir radiación electromagnética de onda larga. El aumento en su concentración (y la de otros GEI) por actividades antropogénicas (causadas por la acción del hombre), refuerzan este conocido mecanismo (efecto invernadero) forzando a un aumento en la temperatura media de superficie. Este efecto se suma, en los registros climáticos observados, a la variabilidad natural del sistema climático que abarcó un muy amplio espectro de escalas tal cual lo demuestran los registros históricos previos a la era industrial.

El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), que congrega a la comunidad científica internacional, ha venido publicando informes desde principios de la década del 1990 en este respecto. Su cuarto informe concluye que la temperatura global ha aumentado entre 0.57°C y 0.95°C en los últimos 100 a 150 años (IPCC, 2007a). El informe también concluye que el calentamiento del sistema climático es inequívoco y evidenciado a través de mediciones en los aumentos de las temperaturas del aire y los océanos, así como en el derretimiento de glacia-

les y aumentos en el nivel del mar (IPCC, 2007a; IPCC, 2007b). Dicho informe establece con muy alta probabilidad que estos efectos observados son de origen antropogénico y también incluye ejemplos de impactos que el calentamiento global está teniendo en la agricultura, los bosques y la salud humana.

El informe finalmente incluye escenarios posibles del clima futuro que podrían afectar la producción agropecuaria alrededor del mundo. Muchos estudios conducidos en los últimos 20 años sugieren que los rendimientos de los cultivos podrían ser severamente reducidos en condiciones de temperaturas más altas como consecuencia del acortamiento de la estación de crecimiento y por aumentos en la presión de enfermedades (por ejemplo, Parry et al., 2004; Parry y Rosenzweig, 1994; Rosenzweig y Iglesias, 1994; Baethgen y Magrin, 1995; Schneider et al., 2001). Más aún, los sistemas agropecuarios que ya son frágiles en las condiciones actuales (tales como el Nordeste de Brasil, el Sahel de África) podrían volverse insostenibles bajo las condiciones esperadas por algunos escenarios climáticos del IPCC (Baethgen, 1997). La mayoría de los estudios sugieren que las regiones más severamente afectadas desde el punto de vista socioeconómico serían las regiones tropicales y subtropicales que es donde se encuentra la mayoría de los países en vías de desarrollo.

Aún considerando los escenarios más optimistas de acciones coordinadas a nivel global para reducir drásticamente las emisiones de los GEI, la ciencia confirma que en las próximas décadas el calentamiento global es inevitable. Tal como

se indica en el cuarto informe del IPCC, suponiendo que la concentración de GEI en la atmósfera permaneciera constante en los niveles del año 2000, la inercia causada por las emisiones pasadas causaría un calentamiento global inevitable con los consecuentes cambios en el clima. Incluso bajo este escenario exageradamente optimista, es necesario desarrollar estrategias de adaptación para responder a dicho calentamiento. Por otro lado, los escenarios más realistas de emisiones de GEI y las concentraciones de los mismos esperadas en la atmósfera hacen aún más necesario que los diferentes sectores socioeconómicos, incluyendo el agropecuario, establezcan estrategias para la adaptación a los ya existentes cambios climáticos.

## 1.2. Adaptación: ¿un problema de hoy?

### Escenarios climáticos: Incertidumbre y conflictos de escala

Los tomadores de decisiones que actúan en los sectores privado y público, incluyendo los responsables de diseñar políticas nacionales y regionales, enfrentan la continua presión de tener que responder a problemas que requieren acciones inmediatas. Más aún, en general los efectos de sus acciones deben ser evidentes dentro de los plazos relativamente cortos en que operan (típicamente 2 a 5 años, hasta 10). Esto hace que frecuentemente se asigne a los problemas de plazos largos (30 años o más) una prioridad relativamente menor.

Por otro lado, la comunidad científica internacional que trabaja en cambio climático y sus impactos esperados sobre las sociedades, se ha enfocado frecuentemente en la elaboración de escenarios climáticos que pueden ocurrir en las próximas décadas (por ejemplo en los años 2070 o 2100). Este enfoque ha sido extremadamente efectivo para aumentar la toma de conciencia del público en general sobre los riesgos asociados a los cambios climáticos y ha resultado un esfuerzo importante para promover el uso de fuentes de energía más limpias, estimular prácticas de secuestro de carbono y otras acciones tendientes a disminuir las emisiones netas de GEI.

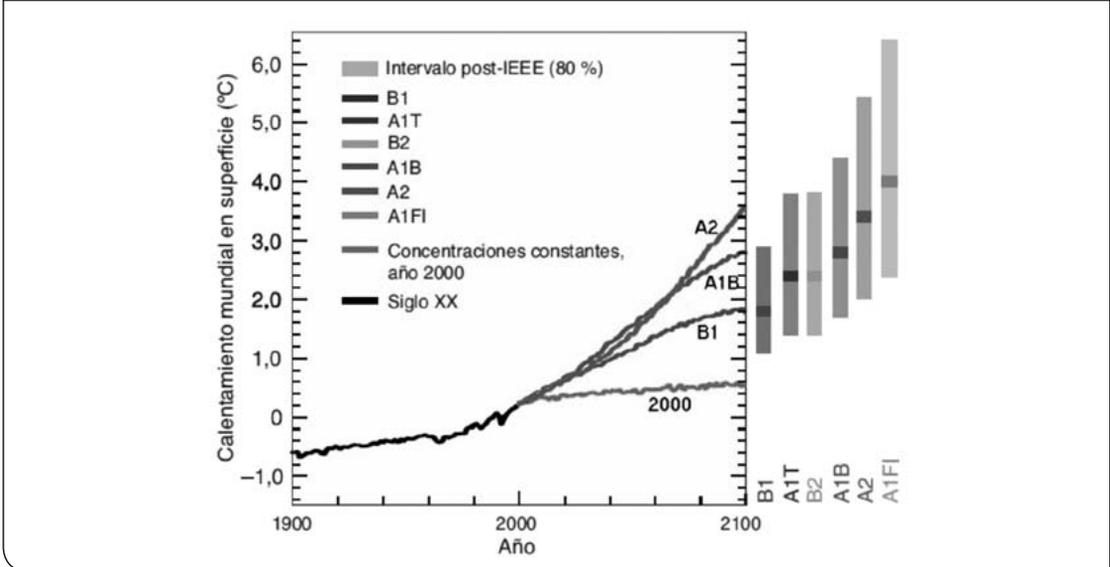
El enfoque científico en escenarios climáticos posibles para los próximos 70 o 100 años ha situado el cambio climático como un proble-

ma que va a afectar a la sociedad en un plazo de tiempo muy posterior al que compete a las agendas de los políticos y tomadores de decisiones en general. Más aún, los escenarios de clima futuro que se pueden producir con los mejores métodos científicos disponibles, presentan un nivel de incertidumbre que genera desafíos aún mayores al ser considerados en forma práctica en las actividades de planificación y toma de decisiones. Dichos niveles de incertidumbre se deben en parte a las limitaciones en el conocimiento científico en el que se basan los modelos utilizados para generar los escenarios. Pero también se deben a los supuestos que se hacen en relación a los escenarios socioeconómicos futuros y las emisiones de GEI asociados que alimentan a los modelos climáticos. Por ejemplo los escenarios socioeconómicos incluyen un amplio rango de supuestos relacionados con tasas de intercambio, fuentes de energía, transferencia de tecnologías, etc. para los próximos 50 a 100 años que inevitablemente contienen incertidumbres (ver por ejemplo: el rango de proyecciones de temperaturas compiladas por el IPCC en 2007, figura 1).

Los escenarios futuros de precipitación contienen incertidumbres mayores que los de temperaturas por ser un campo con una mucha mayor variabilidad espacial y temporal en su distribución y de mayor dificultad para los modelos climáticos. Aún así cabe mencionar algunas características generales de los escenarios de lluvia para la región del sudeste de América del Sur que coinciden en señalar un aumento en la precipitación media (concentrado en las estaciones cálidas) (Berbery et al., 2006), ver figura 2. También se verifica un aumento en la evaporación y en la intensidad de precipitación (Tebaldi et al., 2006, no mostrado) como en muchas regiones del globo, siendo ambas manifestaciones de un ciclo hidrológico más intenso típico de un clima más caliente. Concordante con lo anterior (tampoco se muestra) la región del sudeste de América del Sur aparece con incrementos en la escorrentía. El nivel de incertidumbre no permite cuantificar el aumento en los escenarios de precipitación ni determinar cómo se compara su efecto con el de la intensificación de los eventos de lluvia y el aumento de la evaporación en lo que refiere al bienestar hídrico en la región.

La incertidumbre asociada a la determinación de escenarios futuros se ve acentuada al dismi-

**Figura 1:** Proyecciones de aumento de la temperatura global en superficie (en relación a 1980-1999) para varios escenarios incluyendo el de concentraciones constantes al valor del año 2000. Las barras grises a la derecha indican los "mejores estimadores" (la línea sólida en cada barra) y los rangos esperados para seis escenarios socioeconómicos (extraído del cuarto informe del IPCC, 2007).



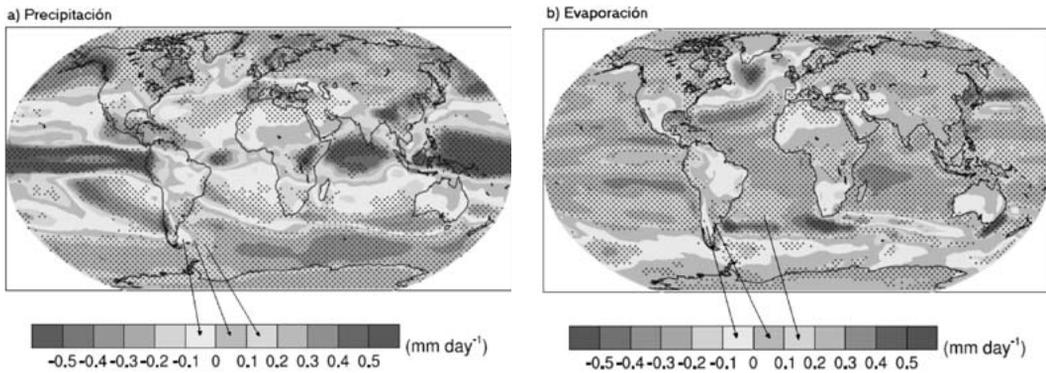
nuir la escala espacial de lo global a lo regional y local. Aún en el caso de la temperatura en superficie, cuya tendencia global es evidente, existen regiones del planeta en donde no es significativa y otras en que incluso es negativa. Factores como cambios en el uso del suelo o polución local complican la detección de la señal de calentamiento antropogénica en escalas pequeñas. La determinación del impacto regional del cambio global viene necesariamente asociada a la comprensión de los procesos físicos que relacionan las variaciones globales con las locales, procesos que son de muy diversa índole y que no siempre están bien modelados. Si bien los modelos climáticos en que se basan los escenarios de futuro simulan el clima en cada punto del planeta, los valores locales tienen mucha mayor incertidumbre que los promedios planetarios -en donde se produce generalmente cancelación de errores-, tal como se puede estimar de la dispersión de valores entre distintos modelos y simulaciones. Cabe señalar que existen métodos (estadísticos y dinámicos) que permiten reducir la escala -es decir aumentar el nivel de detalle- de las salidas de los modelos climáticos globales y llevarlos a niveles regionales o aún locales. Sin embargo es importante recalcar que estos métodos no reducen las incertidumbres asociados de los escenarios globales.

Es importante señalar que el análisis y monitoreo de cambios en los eventos extremos (por

ejemplo sequías e intensidad de precipitación) es aún más difícil que en el caso de promedios climáticos (por ejemplo la temperatura media) pues es necesario contar con series de datos con mayor resolución espacial y temporal. Por lo tanto la generación de escenarios climáticos regionales debe responder a una cuidadosa consideración de tendencias observadas, resultados de modelos numéricos y estado del conocimiento respecto a los procesos físicos involucrados.

En conclusión, existen dos desafíos importantes para incorporar la información de la investigación en cambio climático a la toma de decisiones: los niveles de incertidumbre discutidos previamente y el doble conflicto de escalas. Por un lado los escenarios climáticos se establecen a una escala de tiempo que corresponden a un plazo en el futuro bastante más lejano que el que generalmente se necesita para la toma de decisiones, la planificación y la elaboración de políticas. Por otro lado los mejores escenarios climáticos disponibles aún presentan un nivel de detalle en el territorio que es mucho menor que el que generalmente requiere un tomador de decisiones. Estos desafíos constituyen una de las razones por las que el tema de adaptación al cambio climático generalmente no se ha introducido efectivamente en las agendas de los tomadores de decisiones o en la elaboración de políticas públicas.

**Figura 2:** Diferencia de (a) precipitación y (b) evaporación media anual durante el período 2080/99 respecto al período 1980/99 para el escenario A1B. En las regiones punteadas el 80% de los modelos coinciden en el signo de la anomalía (extraído del cuarto informe del IPCC, 2007).



### Adaptación considerando el rango total de variabilidad climática

El sistema climático de la Tierra incluye mecanismos y procesos que causan variaciones en el clima en diferentes escalas de tiempo y de espacio. Algunos procesos son locales y actúan en el corto plazo o inmediato (unos pocos días) y causan la variabilidad en el estado del “tiempo” (lluvias de hoy, helada de la próxima madrugada, etc.). Otros procesos se ven afectados por la interacción entre la atmósfera, los océanos y la superficie de la tierra y resultan en variaciones del clima a escalas de meses (el caso más conocido de este tipo es el fenómeno de “El Niño” que afecta las lluvias de varias regiones del mundo). Existen también fenómenos que dependen de factores naturales y antropogénicos que causan variaciones del clima a escalas de varias décadas o siglos. Este último tipo de fenómenos incluye la variabilidad climática de muy largo plazo (varias décadas a siglos) que comúnmente se conoce como cambio climático.

Todos estos procesos actúan simultáneamente y resultan en la variabilidad climática total de nuestro planeta. Las diferencias en la magnitud de los cambios en las lluvias (y temperaturas) para las distintas escalas temporales (interanual, multidecádica o de largo plazo) varían en las diferentes regiones del mundo. En algunos casos las variaciones de largo plazo parecen ser más claras que las decádicas (por ejemplo en el SE de América del Sur). Pero en general, las variaciones observadas año a año (es decir la variación interanual) son las de magnitudes más grandes.

Las variaciones del clima en todas estas escalas diferentes son importantes para diferentes usos. Por ejemplo, para el cálculo de obras de infraestructura (carreteras, represas de agua) es importante conocer cómo es la variabilidad en las escalas de décadas y pueden ser importantes también las variaciones de más largo plazo. Por otro lado, para la planificación y la toma de decisiones de más corto plazo es fundamental conocer la variabilidad de un año a otro. Es también importante destacar que es esta variabilidad interanual la que hace que existan años de sequías y años de inundaciones. Sin embargo las otras dos escalas son importantes para determinar si existen períodos en los que dichas sequías o inundaciones son más o menos frecuentes.

En algunas regiones del mundo las variaciones a largo plazo son fundamentales. Existen casos en que el suministro de agua para consumo y/o para riego depende del derretimiento de glaciales en primavera y verano (por ejemplo en la región Andina de América del Sur). En esos casos el calentamiento global de las últimas décadas ha resultado en una reducción del tamaño de los glaciales por lo que en pocos años el suministro de agua puede verse seriamente amenazado. Sin embargo, en la mayoría de los casos los eventos climáticos que más preocupan en el sector agropecuario son aquellos relacionados con las variaciones de un año a otro (variabilidad interanual). Es decir los años con lluvias sensiblemente menores que lo normal o con heladas tempranas/tardías, temperaturas más altas que lo esperado, etc., que a su vez resultan

en impactos importantes sobre la producción agropecuaria. Los impactos son especialmente grandes cuando se presentan eventos climáticos extremos tales como las sequías o las inundaciones. Las investigaciones incluidas en los informes del IPCC indican que en el futuro puede esperarse que la variabilidad interanual aumente, y que existan eventos climáticos extremos más frecuentes y más severos. Por estas razones, una buena forma de contribuir a mejorar la adaptación a los cambios climáticos futuros consiste en disminuir las vulnerabilidades de los sectores socioeconómicos a las variaciones del clima de hoy (incluyendo los eventos extremos), es decir mejorar su capacidad de adaptación a la variabilidad climática actual.

### Variabilidad climática en Uruguay hoy

En esta sección se presentan resultados seleccionados que muestran la variabilidad climática para diferentes escalas temporales en registros pluviométricos en Uruguay. Se presenta inicialmente el test de tendencia de Kendall-Mann para los totales anuales y estacionales: primavera/verano (Oct.-Mar.) y otoño/invierno (Abr.-Set.) en cada uno de 9 estaciones pluviométricas para el período 1919-2008 (Tabla 1). Se comprueban tendencias crecientes muy significativas, sobretudo en verano, y se verifican algunas variaciones regionales. En función de la intensidad y robustez estadística en las tendencias observadas y de la distribución geográfica se definen 3 regiones homogéneas: Región Suroeste

**Tabla 1.** Tendencias crecientes de precipitación anual en el período 1919-2008 por estación pluviométrica y significancia estadística según test de Kendall-Mann para totales anuales y estacionales.

Estación Pluviométrica	Tendencia [mm/año]	Significancia Estadística		
		Anual %	Verano %	Invierno %
Prado	1,7	99,7	99,9	55,9
Colonia	2,3	99,9	100	39,4
Paysandú	2,7	99,6	100	23,5
Mercedes	5,2	100	100	93,2
Salto	4,4	99,0	100	92,2
Rivera	3,6	99,0	99,5	86,4
Melo	5,5	100	100	99,9
Treinta y Tres	4,7	100	100	97,5
Rocha	4,4	100	100	98,6

(Prado, Colonia, Paysandú); Región Noroeste (Mercedes, Salto, Rivera) y Región Este (Melo, Treinta y Tres, Rocha).

Si bien notoriamente significativas, las tendencias seculares son de menor amplitud que la variabilidad de mayor frecuencia. A modo de ejemplo, la Figura 3 presenta la serie temporal de precipitación durante Oct.-Mar. para la región Noroeste (línea fina), la mejor aproximación lineal (línea gruesa) y una versión filtrada, con un filtro binomial de 9 puntos con el fin de remover las variaciones de período más corto.

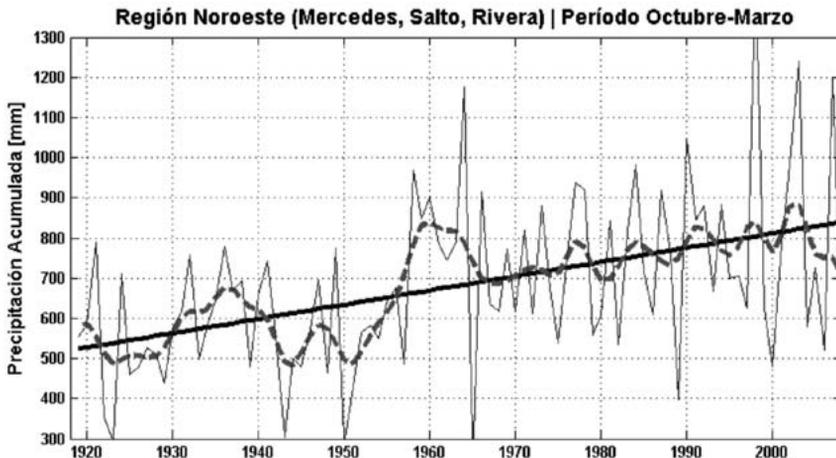
La tendencia lineal representa una variación de aproximadamente 300 mm en el período. Se observan también variaciones multianuales (décadas) que tienen período y amplitud variable, entre 100 y 300mm. Por último es evidente que la amplitud de la variabilidad interanual es la dominante con amplitudes de 500 mm y más. Se observa a su vez que la misma es particularmente intensa en las últimas décadas.

A continuación se cuantifica el impacto de las tendencias observadas en prácticas usuales como es la de estimar la distribución del clima esperado de una variable en función del registro histórico disponible o de una longitud dada, típicamente 30 años. El objetivo es determinar los sesgos incurridos en el pasado de haber aplicado sistemáticamente dicha metodología para la precipitación mensual en Uruguay en las regiones definidas.

Para ello se consideran los últimos 60 años (1949-2008) de las series disponibles y, para cada año, se estima el clima esperado en función de: (i) todo el registro desde 1918 al año inmediato anterior y (ii) los 30 años inmediatos precedentes. En cada año considerado, se calcula el percentil del registro observado en relación a la distribución esperada –según se indicó– para dicho año (que va variando a medida que transcurre el tiempo). En particular, se cuentan los casos que caen en los deciles extremos y en cada cuartil. En un clima estacionario, los 60 años considerados poblarían uniformemente la distribución esperada, cayendo con igual probabilidad en cada cuartil. Se repitió la metodología descrita para los promedios regionales y para varias temporadas del año.

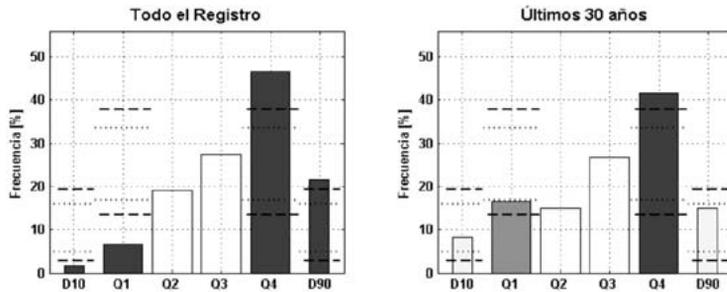
La Figura 4 muestra la frecuencia en el período 1949-2008 de cada cuartil y de los deciles extre-

**Figura 3:** Precipitación de primavera-verano en la región Noroeste para el período 1919-2008 (línea fina), ajuste lineal (línea gruesa) y serie temporal filtrada con filtro binomial de 9 puntos (línea rayada).

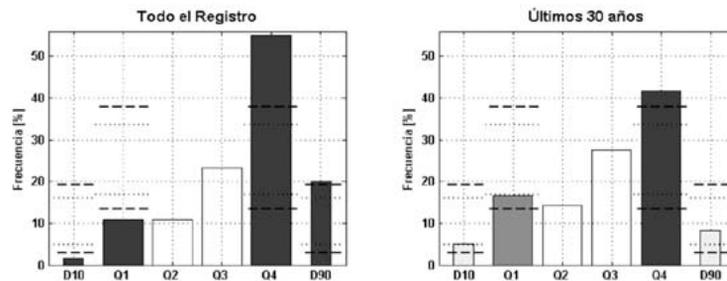


**Figura 4:** Frecuencia, durante el período 1949-2008, de deciles extremos y cuartiles de la precipitación anual en las regiones Noroeste, Este y Suroeste respecto del clima esperado según se le estime con todo el registro previo o solamente con los 30 años inmediatos anteriores. Líneas punteadas (a rayas) indican niveles de 95% (99%) de significancia estadística respectivamente.

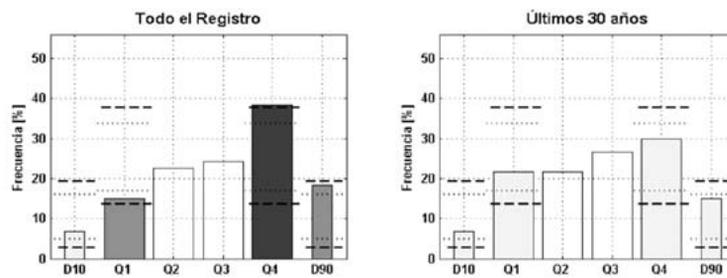
**Región Noroeste  
Anual | 1949-2008**



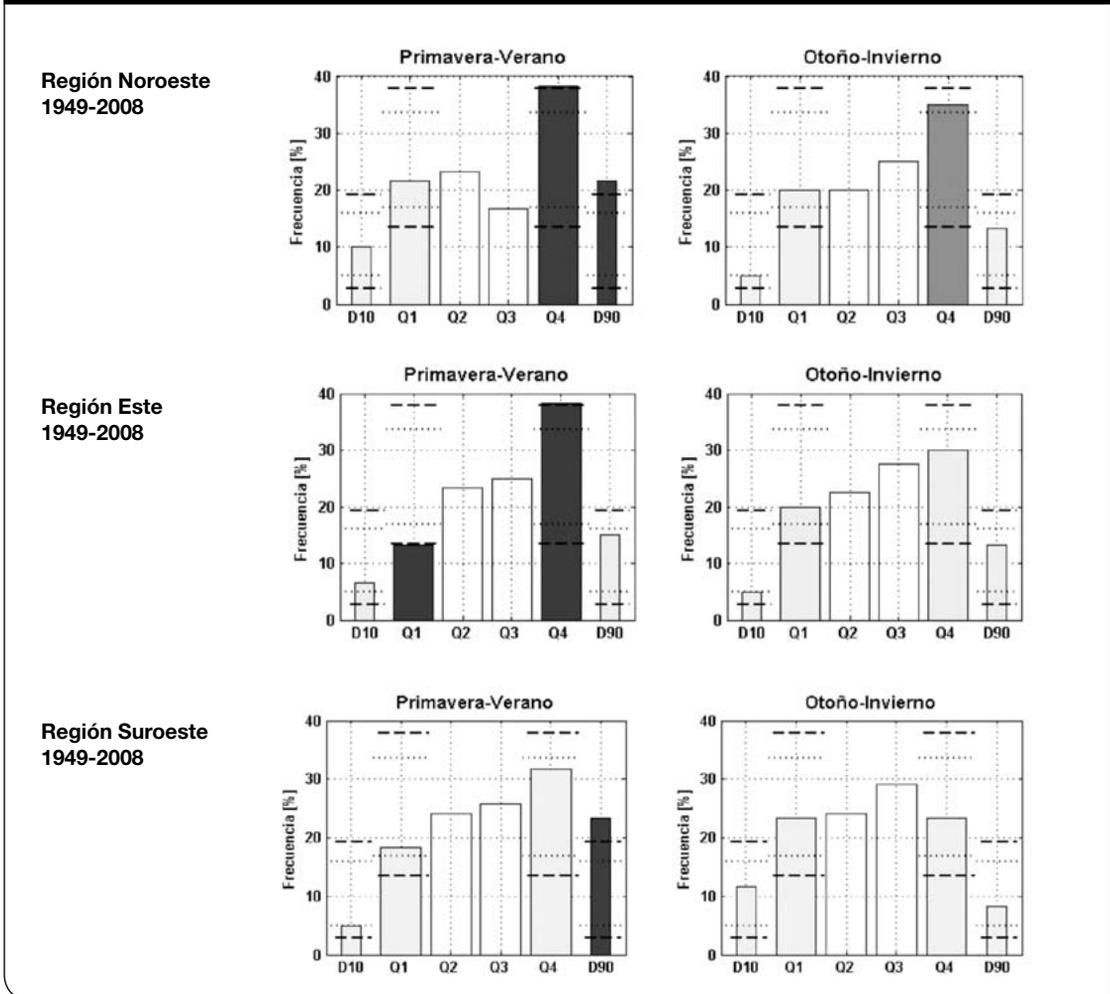
**Región Este  
Anual | 1949-2008**



**Región Suroeste  
Anual | 1949-2008**



**Figura 5:** Frecuencia, durante el período 1949-2008, de deciles extremos y cuartiles de la precipitación semestral (Oct.-Mar. y Abr.-Set.) en las regiones Noroeste, Este y Suroeste respecto del clima estimado por los 30 años inmediatos anteriores. Líneas punteadas (a rayas) indican niveles de 95% (99%) de significancia estadística respectivamente.



mos respecto de la distribución de precipitación anual esperada para cada una de las regiones, según si la misma se estima a partir de todo el registro histórico disponible o solo de los últimos 30 años inmediatos anteriores a cada año. Se muestran, para los cuartiles y deciles extremos, los intervalos de significancia estadística al 95% y 99%, que indican la probabilidad de que por azar y en un muestreo de 60 años se obtengan frecuencias por sobre (o debajo) de dichos valores en ausencia de tendencias en la distribución histórica (clima estacionario).

Es notorio que ya no se justifica la utilización de todo el registro histórico a riesgo de tener graves sesgos en la estimación del clima actual. Aún en el caso de utilizar solo los últimos 30 años, se verifican sesgos significativos (al 95%) y muy

significativos (al 99%) en la frecuencia de casos en el cuartil superior (por exceso) e inferior (por defecto) en las regiones Noroeste y Este. Los sesgos no son significativos con esta metodología en la región Sur ni tampoco en la frecuencia de los deciles extremos en ninguna de las regiones.

La Figura 5 es equivalente a la Figura 4 pero para los totales estacionales de precipitación y solo para el caso en que las distribuciones esperadas fueron estimadas en base a los 30 años inmediatos anteriores. Como ya fuera señalado en la sección de tendencias regionales, es notoria que las tendencias son más fuertes en el período Oct.-Mar., alcanzando frecuencias del 40% para el cuartil superior en las regiones Noreste y Este.

Por último se comprueba que, para las regiones Noroeste y Suroeste, hay una muy alta frecuencia (estadísticamente significativa al 99%) de años en el decil superior, más del 20% de los casos, lo cual refleja que parte del aumento en los totales estacionales se debe a pocos años con montos muy importantes de precipitación.

Más allá de la alta significancia estadística de muchos de los resultados, es notable comprobar la magnitud de los sesgos que surgen de estimar el clima futuro en base al clima reciente, aún limitando el registro a 30 años, tal cual es tradicional. Es interesante comparar dichos sesgos con los que surgen de pronósticos estacionales del clima (por ejemplo en base al fenómeno de El Niño-Oscilación Sur) que muchas veces son de menor magnitud. Las frecuencias presentadas son las que cabría esperar en la hipótesis de que las tendencias climáticas observadas se mantendrán en el futuro (clima no estacionario pero no acelerado), aunque no hay ningún argumento físico que respalde dicha suposición con firmeza.

### 1.3. Gestión de riesgos climáticos

#### Una estrategia de adaptación

En términos más generales, una manera de fomentar la inclusión del cambio climático en la elaboración de políticas y en la toma de deci-

siones consiste en considerar a los cambios del clima dentro de todo el rango de variaciones climáticas: desde meses y estaciones hasta décadas o siglos, en contraposición a considerar los cambios de largo plazo en forma exclusiva y aislada. Utilizando este enfoque es posible generar información con diferentes escalas de tiempo que serán relevantes y utilizables para decisiones con diferentes horizontes (Baethgen et al., 2004).

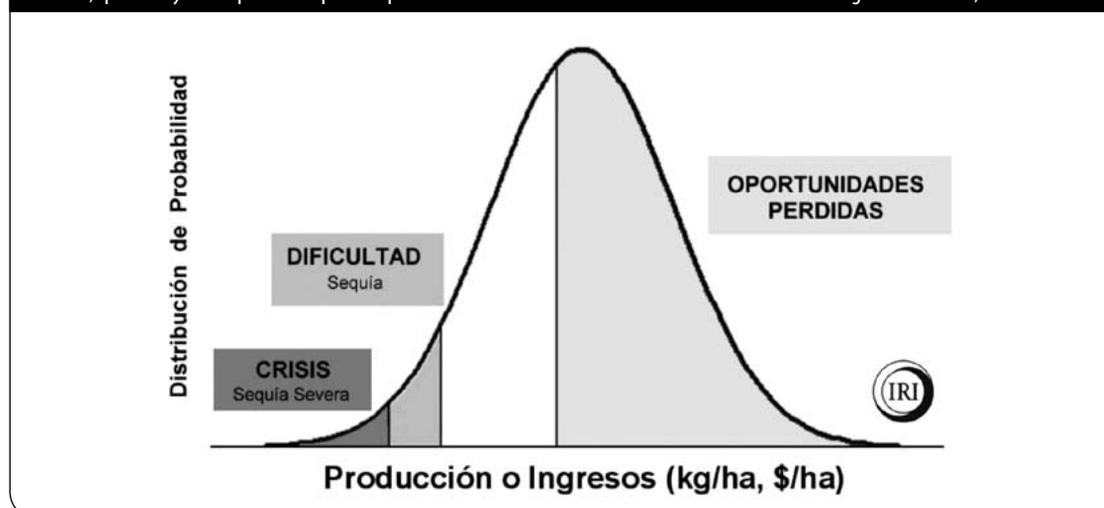
Este enfoque introduce el cambio climático como un problema del presente (en contraposición a un problema del futuro) y apunta a informar y asistir a los procesos de toma de decisiones, planificación y elaboración de políticas para reducir la vulnerabilidad socioeconómica a la variabilidad y el cambio climáticos. El IRI y varias instituciones colaboradoras han venido utilizando este enfoque y lo denominan “Gestión del Riesgo Climático”.

#### Cuatro pilares

El impacto de la variabilidad climática sobre las actividades productivas en diferentes sectores socioeconómicos (por ejemplo agricultura o gestión de los recursos hídricos) puede ser representado por la curva de probabilidades típica con “forma de campana” (Figura 6).

Es así que en unos pocos años existen eventos que son tan extremos que generan situaciones

**Figura 6:** Variación esperada en la producción o los ingresos en un sistema agropecuario, y rangos de riesgos asociados a la variabilidad climática: crisis (sequías severas), dificultades (sequías o inundaciones menos extremas), y oportunidades perdidas (área de la derecha, que incluyen las ‘pérdidas’ por no aprovechar condiciones normales o favorables con tecnologías adecuadas).



catastróficas como por ejemplo una sequía muy severa. En otros casos la producción se ve afectada por eventos menos catastróficos pero también extremos y muy perjudiciales tales como sequías de menos severidad, inundaciones o tormentas. Si bien los eventos climáticos son relativamente poco frecuentes, pueden perjudicar significativamente la productividad agropecuaria. A veces los impactos perduran por varias zafas induciendo a que la planificación de la producción se diseñe con la prioridad de evitar o minimizar los perjuicios relacionados. Por ejemplo, los agricultores frecuentemente prefieren usar tecnologías *precautorias* que no tienen expectativas de alta productividad pero que reducen la chance de grandes pérdidas en los años desfavorables. Este tipo de situación resulta en bajas tasas de adopción de tecnologías mejoradas por parte de muchos agricultores, especialmente cuando dichas tecnologías implican gastos (por ejemplo la compra de semillas mejoradas, fertilizantes, etc.). Esto es consecuencia de la conocida aversión al riesgo de las enormes pérdidas que un agricultor puede sufrir en años desfavorables.

Al mismo tiempo el utilizar tecnologías *precautorias* hace que los agricultores pierdan la oportunidad de aprovechar las condiciones climáticas “normales” o favorables que son las que existen la mayoría de los años. Posiblemente la suma de oportunidades perdidas a lo largo de los años tenga un impacto mayor sobre la sostenibilidad de la producción agropecuaria (y por lo tanto sobre el desarrollo del sector) que los eventos extremos, que por definición son poco frecuentes. Por ejemplo en Uruguay (Baethgen, 2001) se ha estimado que al analizar los ingresos económicos de un agricultor durante un período de 30 años de producción de maíz de secano con tecnologías mejoradas, el 60% del total de ingresos acumulados en los 30 años se habían obtenido en solamente 6 años favorables (de ‘buen’ clima y de ‘buenos’ precios). Si ese mismo agricultor no hubiera utilizado tecnologías mejoradas no hubiera aprovechado esos años tan favorables y los ingresos en los 30 años hubieran sido sensiblemente menores.

El enfoque de Gestión de Riesgos Climáticos propone considerar un amplio espectro de escalas temporales de variabilidad climática, y manejar la totalidad del rango de riesgos climáticos: desde los asociados con años o décadas desfavorables

hasta el riesgo de perder oportunidades en los años o décadas normales y favorables. La gestión de todo ese rango de riesgos se apoya en cuatro pilares fundamentales (Baethgen, 2010):

1) Identificar vulnerabilidades y oportunidades relacionadas con la variabilidad y el cambio climático. Este proceso comienza con el análisis de los sistemas de producción en estrecha colaboración con los miembros de la comunidad agropecuaria (pública y privada) identificando los principales desafíos relacionados con el clima y modelizando los sistemas en estudio para identificar vulnerabilidades y/o oportunidades que los miembros de la comunidad pueden no haber identificado.

2) Reducir incertidumbres mejorando el conocimiento climático en el sector agropecuario. Ese conocimiento climático mejorado se basa en: (a) entender el pasado, es decir estudiar la variabilidad climática y los factores que la causan, cuantificar los impactos de dicha variabilidad sobre los sistemas agropecuarios, identificar las medidas de manejo que reducen los impactos negativos y optimizan los positivos, etc.; (b) monitorear las condiciones de factores ambientales relevantes del presente (clima, vegetación, agua en el suelo, presión de enfermedades, etc.); y (c) suministrar la información relevante sobre el futuro: días, estaciones y décadas, dependiendo de la relevancia para las diferentes actividades y decisiones. El conocimiento climático también incluye la identificación de métodos y el desarrollo de herramientas para optimizar el uso de la información climática.

3) Identificar intervenciones tecnológicas que reducen la vulnerabilidad a la variabilidad climática. Por ejemplo mediante la diversificación de cultivos, el aumento de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, la mejora en la eficiencia de uso del agua, el uso de cultivares resistentes a la sequía.

4) Identificar intervenciones de políticas y arreglos institucionales que permiten reducir las vulnerabilidades relacionadas con el clima y aprovechar las oportunidades en condiciones favorables. La reducción de la vulnerabilidad se puede lograr por ejemplo con: (a) sistemas de alerta y respuesta temprana a las crisis, y (b) transfiriendo parte de los riesgos existentes con diferentes modalidades de seguros agropecuarios, créditos supervisados/dirigidos, etc. Los

instrumentos de transferencia de riesgos requieren un gran esfuerzo para la caracterización y cuantificación de diferentes niveles de riesgo (desastres, dificultades) que varían mucho entre sistemas de producción y regiones del mundo. Dicha caracterización y cuantificación es a su vez, un *input* fundamental para las instituciones que diseñan políticas de seguros y reaseguros

En resumen, el enfoque de Gestión de Riesgos Climáticos se basa en la premisa de que la planificación y las decisiones en el sector agropecuario pueden ser mejoradas al ajustarse con información sobre la chance de confrontar zafas (o décadas) favorables o desfavorables. Las decisiones estarán mejor informadas cuando los escenarios climáticos probables se complementen con el entendimiento de la variabilidad climática de la región, el monitoreo de la situación actual y la predicción de la evolución futura si fuera posible (pilar 2). El conocimiento sobre las prácticas y tecnologías que reducen pérdidas y aprovechan oportunidades también contribuye a mejorar las decisiones y la planificación (pilar 3). Sin embargo, e incluso cuando se accede a la mejor información climática (el pasado, presente y futuro), y cuando se utilizan las mejores tecnologías, existirán años en los que van a ocurrir pérdidas. Por esta razón, solamente cuando los agricultores estén cubiertos frente a las pérdidas causadas por 'desastres' y 'dificultades' (pilar 4), podrán adoptar efectivamente tecnologías y prácticas que les permiten aprovechar las condiciones de años normales y favorables.

Una ventaja del enfoque de Gestión de Riesgos Climáticos es su pertinencia para mejorar la adaptación de los diferentes sectores socioeconómicos a la variabilidad climática actual y también a los cambios climáticos de largo plazo. Este enfoque asiste a los usuarios a confrontar posibles escenarios climáticos del futuro pero al mismo tiempo identificó acciones inmediatas para enfrentar la variabilidad climática que en la actualidad afecta a las sociedades. Más aún, los impactos de dichas acciones e intervenciones son visibles y verificables en el corto plazo haciendo que este enfoque sea aún más atractivo para los tomadores de decisiones.

#### **1.4. El riego y la gestión de riesgos**

Dentro del marco conceptual que se viene desarrollando, la incorporación del riego a un sis-

tema agropecuario representa una intervención tecnológica como las mencionadas en el tercer pilar de la gestión de riesgos climáticos. A continuación analizamos cómo repercute e interactúa con los otros pilares ya mencionados, pues allí surgen elementos que son de interés.

#### **Identificar vulnerabilidades y oportunidades**

Es común escuchar la pregunta sobre si la incorporación de riego a un sistema productivo es primordialmente para reducir su vulnerabilidad a los eventos de dificultad o crisis, o para aumentar la productividad media; es decir, aprovechar en mayor medida las oportunidades perdidas (ver Figura 6). Dicha pregunta no tiene una respuesta única, la cual dependerá de la naturaleza del sistema productivo y del rol pretendido con la incorporación del riego en la producción. En general es de esperar que el riego disminuya la vulnerabilidad al estrés hídrico, pero puede llegar a darse el caso de que la adopción de riego se plantee asociada a una fuerte intensificación de la producción y basados en una fuente de agua de fiabilidad moderada, lo cual puede acabar exponiendo el sistema productivo en su conjunto a una mayor vulnerabilidad al clima. Es evidente que, en la medida de lo posible, el productor siempre intentará lograr ambos efectos: reducir su vulnerabilidad y aprovechar mejor las oportunidades. Como ya fue dicho anteriormente, estos son objetivos que en general se presentan como en competencia a la hora de diseñar y tomar decisiones de manejo. Esta tensión persiste con la incorporación de riego.

Lo que sí permite la tecnología del riego es una mayor capacidad de gestión del riesgo, es decir que aumenta –respecto de la situación en secano– el margen de maniobra dentro de la curva de distribución o ingresos de un sistema (Figura 6). Eso implica que para un mismo nivel de vulnerabilidad a eventos adversos es posible lograr un mejor aprovechamiento de las oportunidades o bien que para un mismo nivel de aprovechamiento de oportunidad se logra reducir la vulnerabilidad a las situaciones desfavorables.

La reducción de vulnerabilidad y el aumento de la producción media son simplemente dos caras de la misma moneda, la de la gestión de riesgos climáticos. La tecnología del riego aumenta el margen de gestión pero no la exime. En cada situación habrá que considerar cómo hacer mejor

uso de dicha capacidad de gestión para un mejor y más sustentable aprovechamiento del agua.

### **Reducir incertidumbres mejorando el conocimiento climático**

La incorporación de riego implica que a la gestión de la actividad agropecuaria, que incluye el manejo de agua en el suelo, se agregue la gestión de la fuente de agua y su distribución. En general, como por ejemplo en el caso de un embalse de agua superficial, la escala temporal de las anomalías climáticas que determinan la evolución de la disponibilidad de agua en la fuente son mayores –y muchas veces más predecibles– que las que determinan la evolución del agua en el suelo. Para poner un ejemplo, es mucho más probable que se pueda predecir con cierta habilidad la disponibilidad de agua en un embalse con meses de antelación (que depende de la situación actual y el total de precipitación en escala de meses) que la cantidad de agua en el suelo a semanas (que en general pierde la memoria de la situación actual y depende de la lluvia en intervalos más cortos y por ende menos predecibles).

Este es un beneficio muy importante que está íntimamente asociado con el descrito en la sección anterior. El monitoreo y la predicción climática son capaces de reducir la incertidumbre climática en mayor medida cuando el sistema agropecuario incorpora el riego, logrando mayor tiempo de reacción si se avizoran situaciones favorables o desfavorables en el horizonte. Esta característica beneficiosa de los sistemas bajo riego exige a la gestión del agua y al sistema productivo, incluyendo las capacidades de monitoreo y predicción climática y su difusión.

### **Identificar intervenciones de políticas y arreglos institucionales**

Como ya fue dicho al presentar los cuatro pilares de la gestión del riesgo climático, no hay tecnología ni medida preventiva (incluyendo el riego) que elimine completamente el riesgo climático. Por eso son necesarios arreglos institucionales o comerciales que ayuden a minimizar el impacto de los eventos climáticos adversos. Hay una multiplicidad de instrumentos de distribución de riesgos que ayudan a estos fines. Cuando se introduce el uso de agua de riego en un sistema productivo aparecen instrumentos

adicionales que pueden ayudar a la resiliencia de los sistemas frente a la variabilidad climática.

Una primera gama de posibilidades está asociada a la gestión de los recursos hídricos, podríamos denominarlos '*seguro agua*', y atienden a garantizar la fiabilidad de la fuente de agua. Por supuesto que cada fuente individual (ya sea embalse propio, embalse de terceros, toma directa de curso de agua, acuífero, etc) forma parte de un sistema más amplio: la cuenca hidrográfica. En una gestión integrada a nivel de cuenca, pueden existir arreglos institucionales y comerciales que garanticen que las prioridades de asignación del recurso atiendan, en situaciones de déficit o de crisis, a los sectores más vulnerables. Por supuesto que, como todo instrumento de distribución de riesgo, el mismo ha de tener un costo a ser cubierto en los años normales y buenos. Es notorio que este tipo de arreglos requiere de políticas claras, instituciones fuertes y años de aprendizaje, pero ya existen en Uruguay ejemplos puntuales que funcionan bajo la lógica del *seguro agua*.

En las regiones agrícola-ganaderas, en que la falta de alimento para el ganado constituye un aspecto vulnerable en situaciones de sequía, se puede gestionar el agua de riego con énfasis en la producción del alimento necesario. En dichas circunstancias, la distribución del agua se haría por criterios de eficacia productiva que garantice la producción de alimento en '*pulmones verdes*'. Por supuesto que la compraventa de ración, forraje y animales es ya una práctica rutinaria del sector. Para que dicha práctica sea más eficaz en la reducción de la vulnerabilidad global frente a sequías, hay que empezar a desarrollar mecanismos comerciales multianuales que incentiven ese tipo de producción y ayuden a distribuir el riesgo entre los años. Asociado a esto puede haber una asignación prioritaria de agua para dar una muy alta fiabilidad a estos sistemas.

Las herramientas de gestión de riesgo presentadas en esta sección en realidad son análogas a las descritas en el primer punto de identificación de vulnerabilidades y oportunidades, con la única –gran– diferencia que en aquella instancia se referían a medidas a nivel de predio y ahora son a nivel de cuenca o región. Al involucrar predios, productores y al Estado, en su rol de gestor del recurso hídrico; las consideraciones productivas que se enfatizaron en dicho

punto dan paso a las consideraciones políticas, institucionales y comerciales que son necesarias a la hora de generar instrumentos eficaces para la distribución de riesgo climático asociados al manejo del agua.

---

## 1.5. Consideraciones finales

En nuestro país, y más en general en la región del sudeste de América del Sur, se han verificado en las últimas décadas tendencias climáticas que cualitativamente coinciden con las proyectadas, con incertidumbre, por los modelos en los escenarios climáticos de largo plazo. Sobre dichas tendencias se experimenta también variabilidad decádica y, en forma superpuesta, variabilidad interanual de mayor amplitud que plantea ya hoy un gran desafío para la estabilidad de los sistemas productivos. Los escenarios de largo plazo sugieren además que la magnitud de dicha

variabilidad interanual puede aumentar a largo plazo, lo cual se verifica en décadas recientes.

La mejor estrategia de adaptación a dichos cambios en el clima, que como vimos se presentan en multiplicidad de escalas temporales, surge de adoptar una estrategia integral de gestión de riesgos que se apoya en 4 pilares: identificar oportunidades y vulnerabilidades, reducir incertidumbres, identificar tecnologías que reduzcan el riesgo y políticas que ayuden a diferir y/o mitigar el efecto de eventos desfavorables. Entre dichas tecnologías, la incorporación del riego a los sistemas productivos ayuda a ampliar el rango de gestión del riesgo pudiendo aprovechar mejor las oportunidades sin aumentar la vulnerabilidad. Además tiene el potencial de reducir la incertidumbre esperada y ampliar las posibilidades de políticas y arreglos que ayuden a paliar las situaciones desfavorables.

## 2. Funcionalidad de raíces y agua del subsuelo: su rol en la optimización del riego suplementario

J. Dardanelli, I. Severina y J. Andriani

**Julio Dardanelli:** Estación Experimental INTA Manfredi. (Córdoba, Argentina). Contacto: [juliodardanelli@yahoo.com](mailto:juliodardanelli@yahoo.com)

**Ignacio Severina:** Estación Experimental INTA Manfredi. (Córdoba, Argentina). Contacto: [ignacio\\_severina@hotmail.com](mailto:ignacio_severina@hotmail.com)

**José Andriani:** Experimental INTA. Oliveros. (Santa Fe, Argentina). Contacto: [jandriani@arnet.com.ar](mailto:jandriani@arnet.com.ar)

### 2.1. Introducción

El área sembrada bajo riego suplementario de cultivos que tradicionalmente no se riegan (trigo, maíz, soja, girasol, alfalfa, etc.) se ha incrementado sustancialmente en los últimos años en Argentina. Así, la provincia de Buenos Aires en 2008 tenía bajo riego 48.000 ha (Pecorari, com. pers.). Santa Fe posee actualmente unas 12.000 ha (Andriani, com. pers.); La Pampa 5.000 ha (Quiroga, com. pers.) y San Luis 33.000 ha (Saenz, com. pers.). Información más detallada se presenta para la provincia de Córdoba, cuya superficie bajo riego evolucionó desde 37.000 ha en el año 2000 y 64.000 ha en 2004 (Martelotto et al. 2005), hasta 130.000 ha en 2010 (Martelotto, com. pers.), aunque se podrían regar alrededor de 1,2 millones de ha (Martelotto et al. 2005). Además, la calidad del agua en esta provincia se presenta bajo riesgo de salinidad, con más de un 80% de aguas con conductividad eléctrica menor a 1,5 dS m<sup>-1</sup> y 95% con menos de 2,5 dS m<sup>-1</sup> (Martelotto et al. 2010).

Hay dos factores positivos a tener en cuenta:

- i) La presencia de reservorios subterráneos de agua dulce que permitirían ampliar el área bajo riego.
- ii) El rendimiento potencial con riego de los productos cosechables de cultivos extensivos de secano que se ha incrementado con los avances genéticos. Por ejemplo, en maíz se pueden obtener, en promedio para la región pampeana núcleo sin estrés abióticos, 15 t ha<sup>-1</sup> bajo riego

(Cirilo, com pers) y 9 t ha<sup>-1</sup> en secano (Andrade, com. pers.), con valores extremos en parcelas de ensayo bajo riego de 18 t ha<sup>-1</sup> en siembra del 20 de octubre en Anguil, La Pampa (Funaro, com. pers.). En soja, los rendimientos estimados son, respectivamente, de 5,5 y 3,5 t ha<sup>-1</sup> (Andriani, com. pers.), en tanto que en alfalfa para corte bajo riego se reportan 28,5 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (López et al. 1997), y 12 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Racca et al. 2001), respectivamente. En girasol los rendimientos potenciales bajo condiciones de secano con escaso a nulo estrés hídrico y secano se informan 4,88 t ha<sup>-1</sup> como valores máximos para una amplia región productora de Argentina, con un rendimiento promedio de varios híbridos de 3,82±0,27 t ha<sup>-1</sup> para el primer decil, con un coeficiente de variación de 7,2%. El rendimiento promedio que se puede alcanzar en secano es de 2,74±0,30 t ha<sup>-1</sup> (coeficiente de variación = 11,1%). Estos valores son indicadores de que el riego puede no solo incrementar los rendimientos sino además disminuir el riesgo (menor coeficiente de variación). Los valores máximos de girasol en parcelas de ensayo bajo riego fueron de 5,5 t ha<sup>-1</sup> para cultivos sembrados el 10 de noviembre (Funaro, com. pers.). Por otra parte, la variabilidad de las lluvias en la región pampeana oscila entre 18 y 28%, superando un valor de 15% que se considera un umbral de un patrón de lluvias estables, siendo además de elevada intensidad, (Hall et al. 1992). En Uruguay en tanto, la superficie potencial de riego es de 1.760.000 ha, aplicándose efectivamente al regadío 210.000 ha, o sea que solo se utilizaba hace diez años una novena parte del potencial (Aquistat-FAO, 2000).

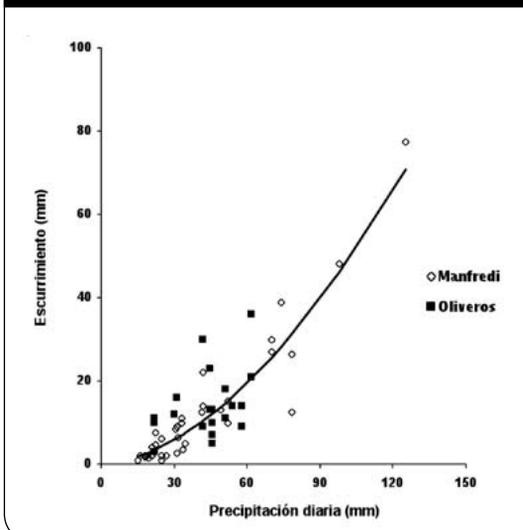
A partir del riego suplementario disminuyen los riesgos de la agricultura en secano y se generan otros escenarios de manejo: i) rango de fechas de siembra independientes del período de lluvias dentro de la ventana propicia en condiciones fototermiales, ii) ubicación del periodo crítico en época de mayor probabilidad y de mayor oferta de recursos como la radiación solar con menos énfasis en la época de mayor déficit hídrico, iii) disminución del riesgo del sistema productivo, circunscripto a variaciones de radiación y temperatura (variables mucho más conservativas que el régimen de lluvias) Aún así, bajo condiciones de riego suplementario sigue siendo importante la fuente de suministro de agua de los sistemas de secano, es decir, una combinación de un recurso presente (agua útil en el perfil), y la capacidad de la planta para extraerlo (profundidad y funcionalidad de raíces). El riego suplementario engloba estos conceptos; siempre el riego suplementará la oferta del ambiente en términos de precipitación efectiva, y aportes de la napa freática, si hubiera. Por lo tanto, este trabajo pondrá énfasis en la funcionalidad de raíces, es decir la capacidad de ellas de aprovechar la oferta del agua del subsuelo como insumo que permita optimizar el aporte del riego suplementario, para el incremento y estabilización de los rendimientos de cultivos de grano, oleaginosos y pasturas perennes.

## 2.2. Resultados

Antes de entrar de lleno en el tema del agua del subsuelo, hay que destacar que el agua, insumo para la transpiración, proviene tanto del riego como de la lluvia y de la napa freática, si la hay. Las pérdidas en términos de agua no transpirada por el cultivo, están constituidas por i) el escurrimiento superficial, ii) la evaporación desde el suelo y iii) el drenaje como flujo saturado o insaturado. La Figura 1 ilustra la importancia que tienen en gran parte de la zona núcleo de producción de cereales y oleaginosos de Argentina las pérdidas por escurrimiento superficial.

Esta Figura sintetiza los datos obtenidos con sucesivas mediciones con sonda de neutrones antes y después de cada evento de lluvia, en suelos bajo siembra directa en cultivos invernales y estivales, barbechos y pasturas, en Manfredi, Córdoba, sobre Haplustoles típicos (Dardanelli et al. 1992), y en Oliveros, Santa Fe, sobre

**Figura 1:** Relación entre el escurrimiento superficial y la precipitación diaria en dos localidades de la región pampeana.



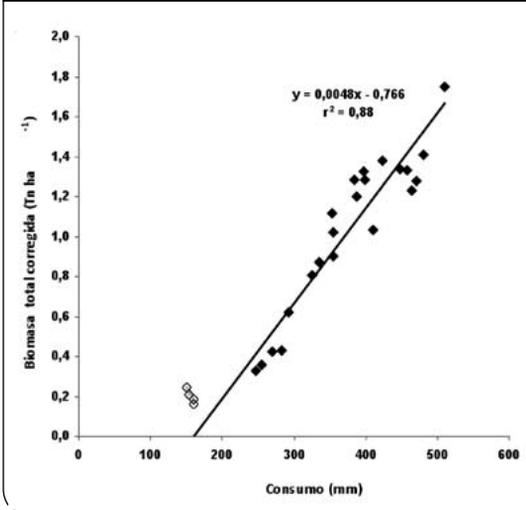
Argiudoles típicos y vérticos. En gran parte de las zonas productoras de cultivos extensivos de las provincias de Santa Fe, Buenos Aires y Córdoba los suelos tienen un horizonte superficial con alrededor del 70% de limo propenso al encostramiento, y aún con prácticas de siembra directa, el escurrimiento es un componente sustantivo de las pérdidas de agua del sistema. Así, de una lluvia de 30 mm se escurrirán en promedio 6 mm y de una de 60 mm, se escurrirán 20 mm.

La evaporación desde el suelo también constituye una pérdida de importancia hasta la completa cobertura de un cultivo bajo riego (Figura 2), de la cual surge que aproximadamente el 30% del agua consumida se perdió por evaporación en etapas tempranas del cultivo.

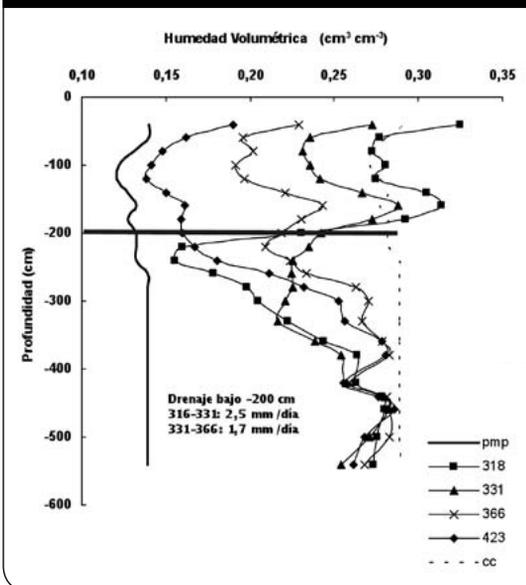
Finalmente, el drenaje por debajo de la zona radical de un cultivo puede ser relevante. La Figura 3 muestra que el flujo de drenaje insaturado entre los días 318 y 366 después de la siembra en un Haplustol típico por debajo de los 2 m de profundidad alcanzó un total de 99 mm, es decir un 30% de los 327 mm de agua útil presentes en ese estrato luego de regado.

La lámina de agua que puede almacenar el suelo es similar en horizontes de diferentes texturas (133 mm m<sup>-1</sup>, Ratcliff et al. 1983), excepto en textura arenosa, donde la capacidad de almacenamiento es menor. En la región pampeana la lámina de agua útil determinada en el rango

**Figura 2:** Relación entre la biomasa corregida por costo energético de un cultivo de maní y el consumo de agua en un Haplustol típico. La intersección entre la línea de ajuste y la ordenada indica la evaporación desde el suelo estimada. Adaptado de Haro et al., (2010).



**Figura 3:** Drenaje por debajo de la profundidad de suelo de 200 cm en un cultivo de alfalfa sembrado en un Haplustol típico. Las cifras de las leyendas indican días después de la siembra.

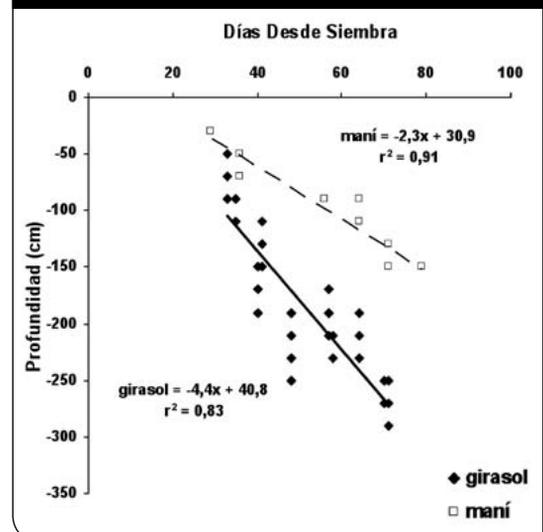


de suelos de franco-arenoso a franco-arcilloso es de 147 mm m<sup>-1</sup> (Dardanelli y Collino, 2002; Dardanelli et al., 2003). Conocida la lámina que se puede almacenar en un suelo, hay que analizar en qué medida el sistema radical del cultivo puede aprovecharla. Su funcionalidad se ha tratado de evaluar a través de mediciones de su

densidad, con escaso éxito. Estudios antiguos (Hamblin and Tennant, 1987), como recientes (Songsri et al., 2008) así lo demuestran. Una técnica mucho más exitosa ha sido evaluar la funcionalidad del sistema radical de determinado cultivo a través de la dinámica del agua en la matriz del suelo en períodos en que la oferta de agua es limitante para el cultivo, en aspectos tales como i) su capacidad potencial para absorber agua, y ii) las limitaciones funcionales del sistema radical debido a la desuniformidad de exploración de la matriz del suelo. La funcionalidad del sistema radical de un cultivo esta dado por la combinación de la velocidad aparente de profundización de raíces (VP) y por la tasa de absorción (TA), una vez que el sistema radical alcanzó un determinado estrato. La VP potencial se puede obtener desde mediciones sucesivas de humedad del suelo en condiciones de sequía luego de rellenado el perfil, graficando la fecha en que se inicia el agotamiento de agua de cada capa de suelo en función del tiempo. Este concepto fue propuesto originalmente por Monteith (1986). En la Figura 4 se puede observar la VP de dos cultivos estivales contrastantes, girasol y maní, que con sus valores de 2,3 y 4,4 cm día<sup>-1</sup>, constituyen los extremos de los cultivos primavera-estivales estudiados en Haplustoles de la provincia de Córdoba (Dardanelli et. al. 1997).

Por otra parte, la TA se determina por la velocidad de agotamiento de un estrato de suelo una vez que las raíces alcanzaron el mismo. El patrón de agotamiento es exponencial y fue des-

**Figura 4:** Velocidad aparente de profundización de raíces en un Haplustol típico. Adaptado de Dardanelli et al., 1997.



cripto inicialmente por Passioura (1983). En la Figura 5 puede observarse un ejemplo para un cultivo de maní (Severina, datos no publicados).

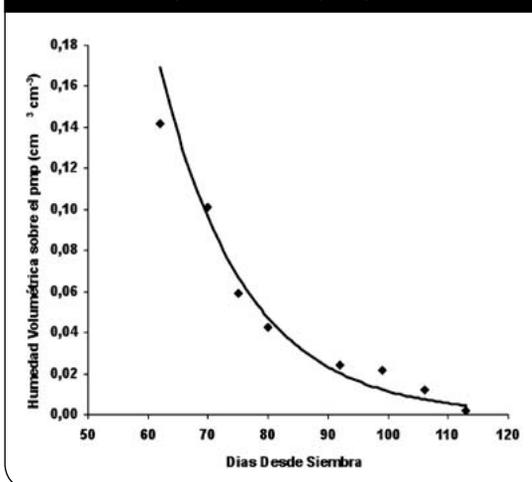
La pendiente de esta curva (cuyo valor se puede obtener por regresión lineal entre el logaritmo natural de los valores de humedad volumétrica sobre el punto de marchitez permanente en función del tiempo), indica cual es la proporción de agua útil remanente que un cultivo puede absorber diariamente. Así por ejemplo, un sistema radical que posea una  $T_A$  de 0,1 en una capa de

20 cm de espesor la capacidad de retención de agua útil es de 30 mm, podría absorber 3 mm día<sup>-1</sup> a capacidad de campo, y 1,5 mm día<sup>-1</sup> si el contenido de agua útil fuera del 50%. En la Figura 6 se pueden observar los valores de  $T_A$  de diversos cultivos en un suelo Haplustol típico, sin limitaciones aparentes para la proliferación de raíces.

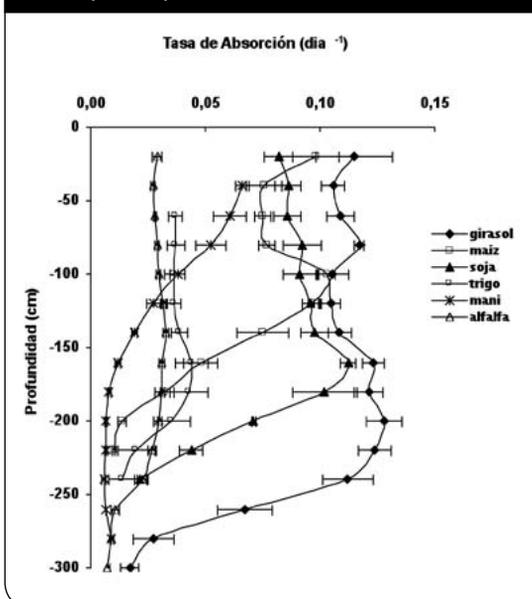
Se advierte que en general, se confirma el supuesto de que no necesariamente la  $T_A$  está relacionada por el decrecimiento de la densidad radical en profundidad, sintetizado en el modelo de extinción exponencial de raíces propuesto por Allan Jones et al., (1991). Se puede inferir entonces una densidad de raíces crítica por encima de la cual la  $T_A$  es máxima, como se observa claramente en cultivos con  $T_A$  contrastantes como girasol y alfalfa. El valor de este parámetro decrece en los estratos profundos donde se pueden esperar densidades de raíces inferiores a un valor crítico. La excepción a tal aseveración la constituye el maní, cultivo que muestra desde las capas superficiales una tendencia decreciente en  $T_A$ , lo que se corresponde aproximadamente con la disminución observada de la densidad de longitud de raíces (Collino et al., 2000). Cabe destacar al girasol con valores de  $T_A=0,11$  día<sup>-1</sup>, (puede absorber el 11% del agua remanente en un día), mientras que el trigo y la alfalfa, con valores entre 0,3 y 0,4 día<sup>-1</sup>. El trigo presenta una estrategia conservativa que condice con el largo tiempo en alcanzar el evento crítico de la antesis (110 días), y que le permite llegar con suficiente agua útil a antesis en climas generalmente deficitarios en invierno-primavera, como el centro y centro-oeste de la región pampeana. La alfalfa sería conservativa por su condición de cultivo perenne lo que le permite sobrevivir durante períodos prolongados de sequía.

La Figura 7 muestra el agua útil remanente después de una sequía terminal de varios cultivos. Se destaca el girasol cuyo sistema radical es el de mayor capacidad de utilización de agua del subsuelo, producto de su elevada  $v_p$  (Figura 4), así como su mayor  $T_A$  (Figura 6). El maní, por lo contrario, hace menor uso de las reservas del subsuelo y deja una cantidad considerable de agua útil en detrimento de su rendimiento bajo sequía y en beneficio del cultivo subsiguiente. La alfalfa presenta un patrón de agua remanente parecido a la mayoría de los cultivos anuales, aunque alcanza mayor profundidad dada

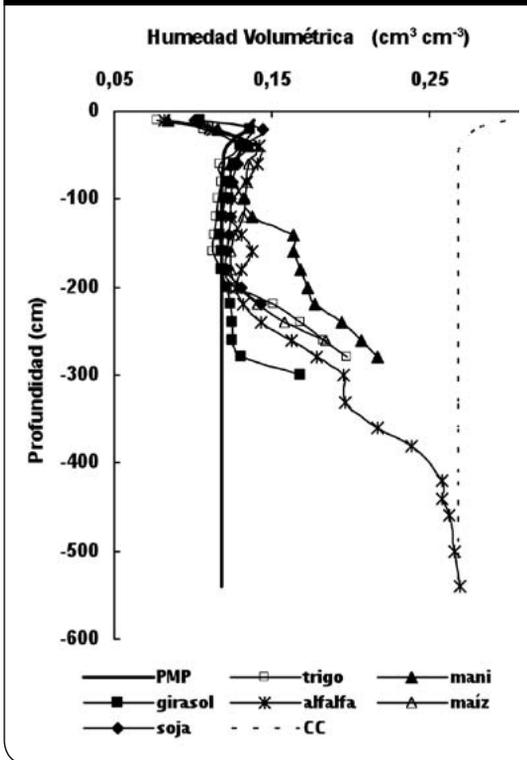
**Figura 5:** Evolución de la humedad volumétrica sobre el punto de marchitez permanente bajo condiciones de sequía en un estrato de suelo Haplustol éntico ocupado por raíces.



**Figura 6:** Tasa de absorción de diferentes cultivos sembrados en un Haplustol típico.



**Figura 7:** Agua útil remanente al final de una sequía terminal en cultivos sembrados en un Haplustol típico.



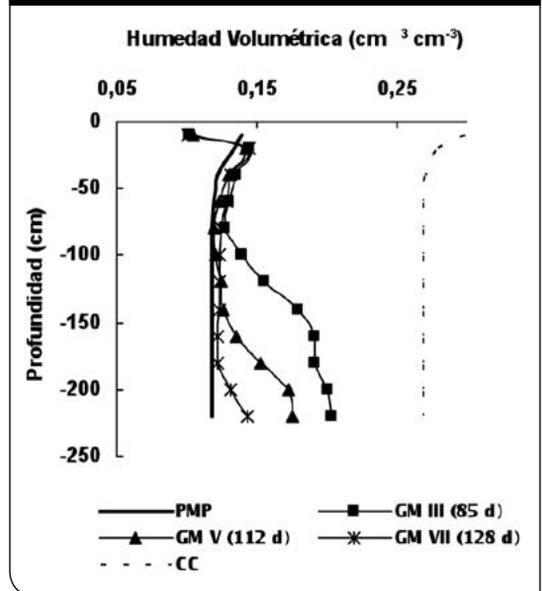
su condición de cultivo plurianual y un prolongado tiempo de siete meses para llegar a sequía terminal (Collino et al. 2005). El trigo compensa su baja  $v_p$  de 2,1 cm día<sup>-1</sup> (Cantarero et al., 2008) y su baja  $T_A$  con un ciclo largo de 180 días en el caso analizado.

En cuanto a variedades, se observa que el agua útil remanente de la soja depende del grupo de madurez (Figura 8), que condiciona la longitud del ciclo, que es más corto en aquellas variedades de menor grupo de madurez por el menor efecto fotoperiódico (Jones et al., 1991).

Todo lo analizado hasta el momento corresponde a situaciones de cultivos en suelos sin limitaciones por disponibilidad de agua en el subsuelo o impedimentos físicos que pudieran alterar la morfología del sistema radical y disminuir la  $v_p$  y/o  $T_A$ . En experimentos llevados a cabo en maní por Severina (datos no publicados) se demuestra que la  $v_p$  es restringida con escasa agua útil en la profundidad de 60 a 200 cm (Figura 9).

El cultivo con menor agua útil en el subsuelo al inicio de la sequía impuesta no puede absorber

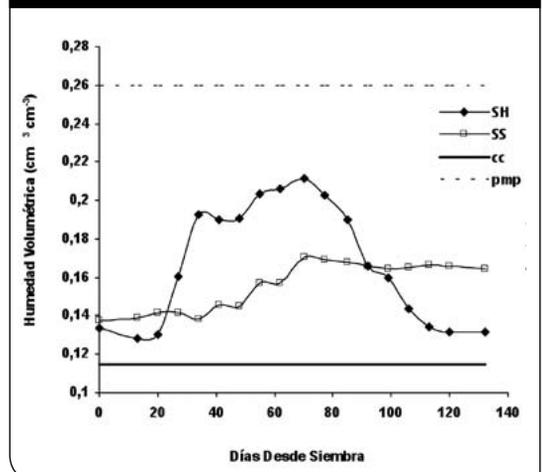
**Figura 8:** Agua útil remanente al final de una sequía terminal en cultivos de soja de diferentes Grupos de Madurez ( $G_M$ ) sembrados en un Haplustol típico. Los números entre paréntesis indican la duración del ciclo para los  $G_M$  iii, v y vii. Adaptado de Dardanelli et al., 2004)



agua en el estrato 160-180 cm sugiriendo ausencia de raíces, en tanto que aquél con mayor agua útil sí puede hacerlo. Se puede atribuir esta diferencia en la  $v_p$  a la resistencia del suelo diferencial sobre la profundización del ápice radical.

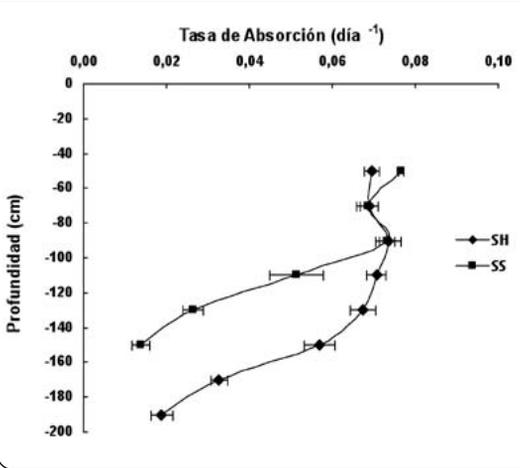
En efecto, Gil (1994) encontró que la resistencia de este suelo aumenta de 15 a 60 kg cm<sup>-2</sup> cuan-

**Figura 9:** Evolución de la Humedad Volumétrica del estrato 160-180 de un suelo sembrado con maní, con sequía impuesta partiendo desde diferentes contenidos de agua útil, contenido alto (SH) y contenido bajo (SS) de agua útil en el subsuelo.



do el agua útil del subsuelo decrece desde capacidad de campo a 20% de agua útil. En concordancia con la disminución de VP, la TA también sufre una reducción importante (Figura 10).

**Figura 10:** Tasa de absorción del cultivo de maní a lo largo del perfil de un Haplustol típico, con sequía impuesta, partiendo desde diferentes contenidos de agua útil en el subsuelo: contenido alto (SH) y contenido bajo (SS).



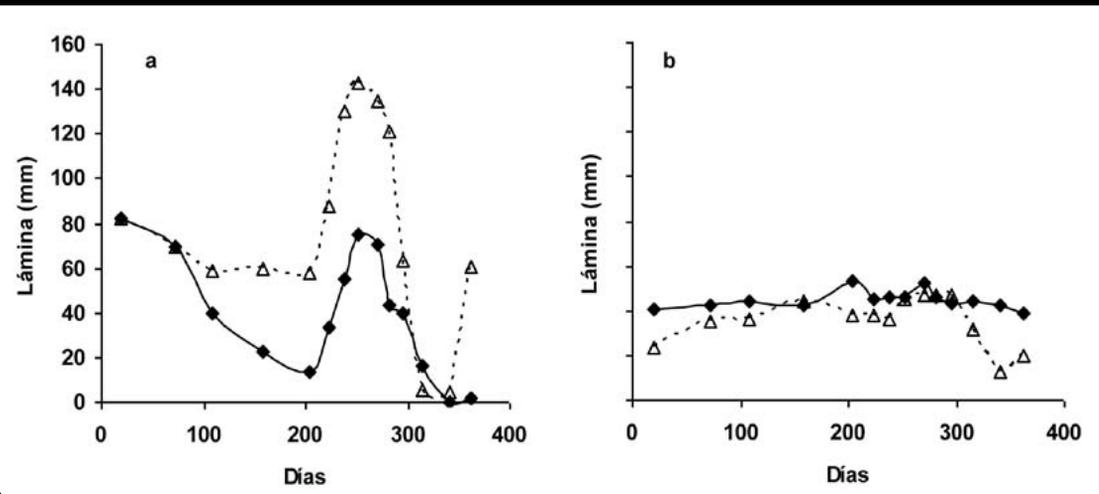
En un experimento llevado a cabo en una microcuencia bajo sistemas de labranza convencional y siembra directa, se observó que en la profundidad 150 a 250 cm el agua útil no puede ser absorbida en el primero de los casos, donde el escurrimiento fue mayor, (Figura 11), porque presumiblemente las raíces no pudieron atra-

vesar capas con bajo contenido de agua y alta resistencia a la penetración.

Con menor cantidad de agua útil en el subsuelo se produce una disminución del rendimiento a través de dos vías; i) la menor disponibilidad hídrica *per se* y ii) la menor capacidad del sistema radical de absorber agua por efecto de la resistencia del suelo. En el Cuadro 1 pueden observarse los efectos de diferentes condiciones de agua en el subsuelo sobre los rendimientos de dos cultivares ASEM 485 INTA, de ciclo corto y mayor partición hacia granos, y FLORMAN INTA, de ciclo más largo y menor partición hacia granos. Siempre ASEM presenta mayores rendimientos, diferencias que se magnifican entre fechas para 70% de agua útil en el subsuelo al inicio de un período de sequía impuesta, porque otros factores como radiación y temperaturas están interactuando. La combinación de radiación decreciente y baja disponibilidad de agua en el subsuelo es una fuerte limitante en fecha tardía en ambos cultivares.

El riego suplementario asociado al agua del subsuelo permitiría optimizar recursos y adelantar fechas de siembra, que en el maní es una práctica de manejo de alto impacto. El relleno del perfil de suelo, que no puede hacerse eficientemente durante el crecimiento del cultivo dado que las raíces interceptan el agua en su descenso a través del perfil, es una estrategia recomendable para el invierno, cuando las posibilidades de pérdidas por evaporación son menores.

**Figura 11:** Lámina de agua útil en dos estratos: a) 0-150 cm y b) 150-250 cm en un suelo Haplustol típico con cultivo de soja seguido de barbecho, bajo sistema de labranza convencional (línea y símbolos llenos), y siembra directa (línea cortada y símbolos vacíos).



**Cuadro 1:** Rendimiento de maní con diferentes porcentajes de agua útil en el subsuelo al inicio de una sequía impuesta (70% y 30%), para fechas de siembra temprana ( $\tau_E$ ) y tardía ( $\tau_A$ ). Los rendimientos máximos provienen de Haro et. al., (2007)

Cultivar	Rendimiento, t ha <sup>-1</sup>				Brecha, $\tau_A/\tau_E$		Rend. Max., t ha <sup>-1</sup> *	
	Te 70%	Ta 70%	Te 30%	Ta 30%	70%	30%	Te	Ta
FLORMAN	1,924	1,012	1,018	0,466	0,53	0,46	4,612	3,129
ASEM	2,156	2,464	1,318	0,668	1,14	0,27	5,125	4,546

Comparando dos oleaginosos como maní y soja, hay marcadas diferencias entre ellas en cuanto a funcionalidad de raíces y consecuentemente en el agua residual. En la Figura 12 se observa que la soja posee un valor más elevado de VA expresado en unidades térmicas sobre una temperatura base de 7,8 °C (Jones et al., 1991), respecto a maní considerando una temperatura base de 11°C (Williams and Boote, 1995).

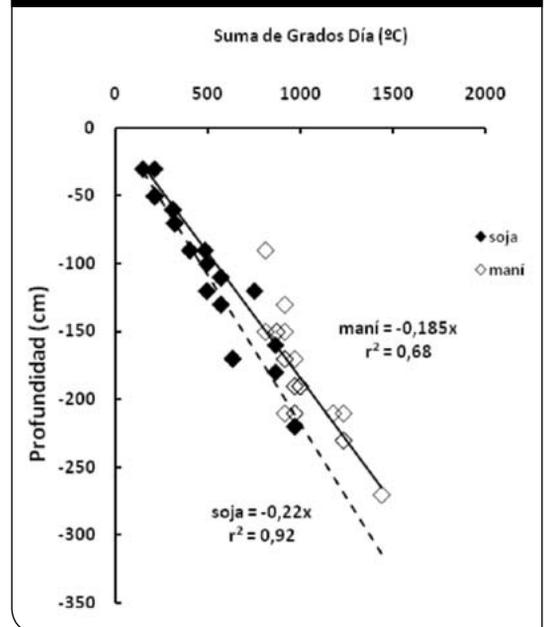
Asimismo, la  $\tau_A$  es mayor en soja, aún comparada con la más elevada  $\tau_A$  del maní en condiciones más favorables de siembra tardía (Figura 13), donde la mayor acumulación de biomasa hasta el inicio de crecimiento de vainas, supone una mayor cantidad de raíces (Severina, datos no publicados).

En consecuencia, la soja presenta un agotamiento total del perfil (densidad de raíces funcionales no crítica) hasta 180 cm de profundidad, mientras que el maní agota el perfil hasta los 120 cm (Figura 14) El agua residual del maní para los primeros 230 cm es de 38, 45 y 56 mm de agua útil, mayor que la soja, que deja solo 13 mm. Por tanto, los riegos suplementarios en maní deberían ser más frecuentes. Hay que pensar que habría una oportunidad de mejoramiento varietal en maní, no solo en precocidad y partición, tal como fuera logrado con la variedad ASEM 485 INTA, sino también en VP y  $\tau_A$  del sistema radical.

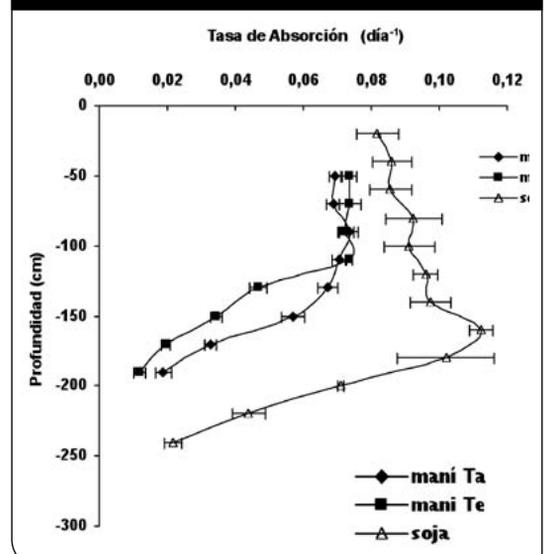
Por último, independientemente de la especie, el tipo de suelo tiene marcada influencia en la distribución de las raíces en el subsuelo que se refleja en las variaciones de  $\tau_A$  presentadas en la Figura 15.

Se puede observar que en un Haplustol Típico no existen impedimentos para la máxima funcionalidad de raíces, en tanto que en un Argiudol típico y más aún en un Argiudol vértico la menor  $\tau_A$  sugiere una distribución desuniforme de raíces en el horizonte B textural, con una recuperación parcial de su distribu-

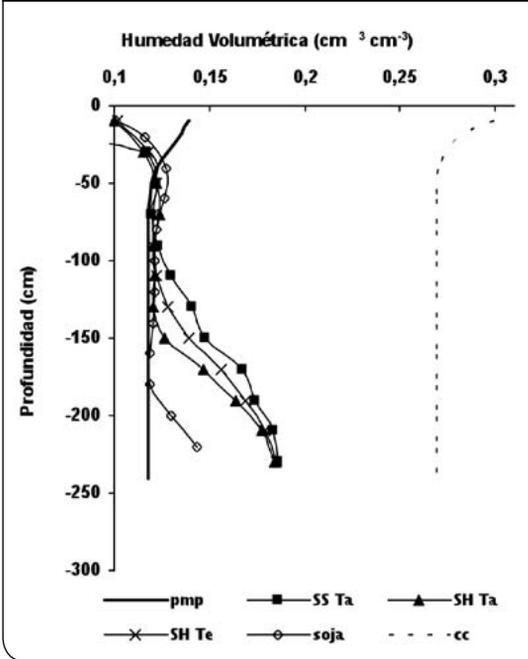
**Figura 12:** Velocidad aparente de profundización de raíces en función de suma de grados días de soja (temperatura base de 7,8°C), y maní (temperatura base de 11°C).



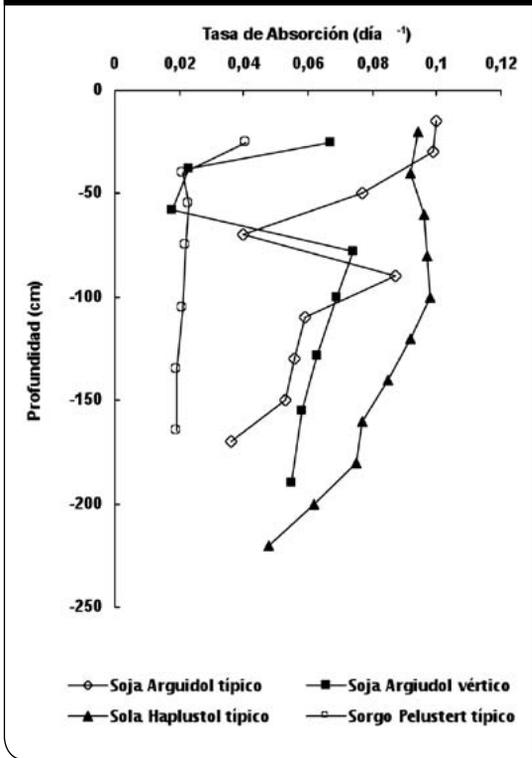
**Figura 13:** Tasa de absorción de soja de maní creciendo sobre un Haplustol Típico en siembra temprana ( $\tau_E$ , cuadrados llenos) y siembra tardía ( $\tau_A$ , rombos llenos), y soja (triángulos vacíos)



**Figura 14:** Agua útil remanente en un suelo Haplustol Entico en cultivos de soja, y maní sometidos a sequía impuesta: en maní se partió desde diferentes contenidos de agua útil en el subsuelo, contenido alto (SH) y contenido bajo (SS) para siembra temprana (TE) y siembras tardías (TA)



**Figura 15:** Tasas de absorción en perfiles de suelo de diferentes tipos.



ción en los horizontes más profundos. Esta disminución de la TA, que es más marcada en los Arguidoles vérticos se atribuye a la formación de un horizonte de iluviación B textural (Vargas Gil, 1973), en particular en los Arguidoles vérticos, permitiendo el paso de las raíces solo a través de las grietas originadas por la acumulación de arcillas expansibles (montmorillonita) en este horizonte (Scoppa y Pazos, 1981). La alteración de la morfología del sistema radical causada por el proceso descrito provoca un efecto sombreado que fuera reportado por Tardieu (1994), por lo cual la TA en los horizontes subyacentes no alcanza los valores que tienen los Haplustoles y Hapludoles a profundidad equivalente (Dardanelli et al., 2004). Es interesante mencionar que la  $v_p$  solo decrece levemente en los Arguidoles vérticos (Dardanelli et al., 2003). Por último en un suelo Pelustert, de la India (Lee, 1996), la distribución desuniforme de las raíces se observa a través de todo el perfil, que contiene 65% de arcilla, mayormente montmorillonita, lo que ocasiona severas restricciones del suelo a ceder agua al cultivo. En este suelo el sorgo presenta una TA uniformemente baja, de alrededor de un 20% del máximo para soja. Esta

baja TA, derivada de la concentración de raíces en las grietas del suelo, causa una rápida entrada a condición de sequía ante ausencia de precipitaciones o riegos, dado que la oferta de agua está severamente restringida por la dificultad del agua de la matriz del suelo para llegar a la zona radical. Este comportamiento sería extrapolable a los Peluderts presentes en el Este de Argentina y en Uruguay, ya que contienen alrededor de 50% de arcillas a lo largo del mismo, en gran parte montmorillonitas expansibles (Imbellone et al., 2010).

La gran mayoría de los suelos agrícolas extensivos de la región pampeana son Haplustoles o Hapludoles, y Arguidoles (Cuadro 2). Hacia el Este se encuentran algunos suelos Peluderts. La suma de Arguidoles y Peluderts en la región pampeana comprende el 45,5 de los suelos agrícolas (Cuadro 2), lo que refleja la importancia de lo desarrollado anteriormente en cuanto a restricciones en la TA de estos suelos. Los Peluderts también se encuentran en parte del Uruguay (Durán et al., 1999), con una superficie aproximada de 900.000 ha (Giménez, com. pers.).

**Cuadro 2:** Superficie correspondiente a los principales grandes grupos de suelos donde se cultiva soja en la región pampeana y categorización según el grado de restricción (GR) que presentan a la proliferación de raíces. (Adaptado de INTA-PNUD, 1990)

Gran Grupo	Superficie millones ha	GR	Suma según GR	Porcentaje según GR
Pelludert	2,91	Alto	2,91	6,5
Arguidol	15,84	Mediano		
Argiustol	1,59	Mediano	17,43	39,1
Haplustol	13,29	Bajo		
Hapludol	11,00	Bajo	24,29	54,4
	44,63			100,0

¿Qué consecuencias tiene todo lo descripto sobre la optimización del riego suplementario? Que el umbral de riego, difundido ampliamente como un criterio para aplicar riego suplementario para evitar déficits hídricos no es estático sino función de: i) la profundidad de las raíces, ii) la proporción del agua aplicada que se destina a transpiración iii) la especie y iv) el tipo de suelo. Además debe tenerse en cuenta la demanda ambiental para la transpiración del cultivo que también influye en el valor del umbral de riego. Las raíces alcanzarán su máxima profundidad efectiva si el subsuelo tiene suficiente agua útil; la evaporación en detrimento de la transpiración se atenuará evitando el riego durante el período de cobertura incompleta, en particular en cultivos primavero-estivales la especie influye por sus diferentes VP y TA, y el tipo de suelo es fundamental porque afecta marcadamente la TA en función de diferentes niveles de restricción a la distribución de las raíces funcionales para la absorción de agua. En consecuencia, el umbral varía día a día, por las características dinámicas tanto por la oferta de agua como por la demanda. Los Cuadros 3 y 4, ilustran, respectivamente, ante diferentes valores de evapotranspiración potencial, las diferencias de umbrales entre

algunas especies en un suelo Haplustol y las diferencias de umbrales de la soja en los tres tipos de suelo antes descriptos. Puede observarse que el maíz, por su funcionalidad radical tiene los umbrales de riego más altos, y el girasol los más bajos (Cuadro 3), y que para la soja, el Peludert debe ser regado con más frecuencia por presentar un umbral de riego sensiblemente mayor al Arguidol y al Haplustol, que tiene los umbrales menores.

Comentarios adicionales merece la influencia de la napa freática como un complemento del riego para suplir agua a los cultivos en una amplia área de la región pampeana. Se ha observado en alfalfa un efecto sistemático de la napa freática favoreciendo el incremento de la producción de forraje. Por ejemplo en Rafaela (Santa Fe), una napa ubicada a 225 cm de profundidad, contribuyó a satisfacer el 13% de la demanda potencial del cultivo (Dardanelli and Collino, 2002), calculada en base a los resultados reportados por López et al., (1997), mientras que la precipitación efectiva, estimada a partir de la ecuación de ajuste obtenida por Dardanelli et al., (1992), aportó el 45% de la demanda. Es decir que el aporte de la napa no resolvió completamente el déficit de agua del cultivo, siendo necesaria de todos modos la aplicación de riego suplementario.

**Cuadro 4:** Umbrales críticos, expresados como porcentajes de agua útil, por debajo de los cuales la evapotranspiración potencial del cultivo de soja (ETc) no puede ser satisfecha totalmente. Estos umbrales se calcularon para un perfil de 2 metros, asumiendo un sistema de raíces completamente desarrollado. Adaptado de Dardanelli y Andriani (2003).

Tipo de suelo	ETc, mm d-1		
	3	5	7
Haplustol	10-15	20	25-30
Arguidol	15-20	25-30	40-45
Peludert	35	60	80-85

**Cuadro 3:** Tasa de absorción máxima (TAM), profundidad con raíces que presentan tasas de absorción máxima (PRTAM), profundidad máxima de raíces (PRmax), agua útil hasta PRmax, umbral crítico (en porcentaje y lámina de agua útil), para una evapotranspiración potencial de 8 mm d-1 (ETc8mm d-1) y de 4 mm d-1 (ETc4mm d-1). Adaptado de Dardanelli et al. (2002) en base a Dardanelli et al. (1997).

Especie	Ciclo d	TAM %	PRTAM cm	PRmax cm	AU Mm	ETc8mm d-1 % mm	ETc4mm d-1 % mm
Girasol	105	11,4	250	290	435	18 88	9 44
Soja	140	9,5	190	250	375	26 98	13 49
Maíz	125	8,4	130	210	315	37 117	18 56

rio. Otro tipo de aporte de la napa que podemos considerar “indirecto” fue observado durante el barbecho de soja en un Haplustol típico de Manfredi (Córdoba), donde la napa se encontraba a 420 cm de profundidad. El flujo insaturado durante el barbecho permitió el aporte extra de 133 mm en los 300 cm superiores del perfil, con la ventaja adicional de que se logró una distribución uniforme del agua del subsuelo que previene la ocurrencia de niveles de resistencia del suelo críticos para un óptimo desarrollo del sistema radical.

---

### 2.3. Consideraciones finales

Reforzando el concepto de que el riego es suplementario a otros aportes hídricos en cultivos extensivos tradicionalmente regados en secano, se ha puesto énfasis en primer lugar en las limitaciones del agua de lluvia para suministrar agua a la matriz del suelo, que es fuente de transpiración del cultivo, debido a pérdidas por escorrentía, evaporación desde el suelo y drenaje. Una vez logrado un almacenaje determinado de agua en el subsuelo, se han analizado interacciones de factores a tener en cuenta para la optimización del riego (que es un insumo en general caro), dado que el recurso subterráneo

es el recurso mayoritariamente usado en las superficies incorporadas para este tipo de cultivo. Estas interacciones son complejas pero abordables: tasas potenciales de profundización de raíces y tasas de absorción, dependientes ambas de la especie; limitaciones de suelo para suplir agua al sistema radical, y aportes de la napa freática. La optimización del riego suplementario debe contemplar el relleno del perfil según la profundidad potencial de enraizamiento, pero evitando las pérdidas por drenaje saturado o insaturado, y evitando también la aplicación de láminas en épocas de fuerte evaporación desde el suelo (por ejemplo los períodos tempranos en cultivos estivales). Se enfatiza el concepto dinámico del umbral de riego en función de la profundidad de raíces, la tasa de absorción, el tipo de suelos y la demanda ambiental modal. El riego suplementario optimizado, será una herramienta importante para ampliar las ventanas de siembra, permitiendo ubicar los períodos críticos en períodos de mejor aprovechamiento del recurso que hace al incremento de biomasa, la radiación fotosintéticamente activa. Este trabajo ha pretendido ayudar a desarrollar criterios dinámicos y flexibles del manejo del riego *en pos* del uso equilibrado de los recursos agua del subsuelo y agua proveniente del riego suplementario.

# 3. Efectos de la disponibilidad hídrica en diferentes etapas de desarrollo de maíz y soja

L. Giménez

Luis Giménez: Departamento de Producción Vegetal, EEMAC, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Uruguay. Contacto: [kapoexe@fagro.edu.uy](mailto:kapoexe@fagro.edu.uy)

## 3.1. Introducción

El sector agrícola del país en los últimos años ha presentado cambios sin precedentes, entre las transformaciones producidas se destaca un incremento significativo en la superficie de siembra de cultivos estivales.

A partir del año 2001, ocurre un aumento constante del área sembrada de soja, el cual es acompañado por aumentos de menor impacto en las superficies de maíz y sorgo, transformando la tendencia histórica de una agricultura con superficie más o menos estables, y principalmente invernada, en una actividad agrícola con áreas de siembra crecientes y con predominio de los cultivos de verano.

En la región se ha identificado como principal limitante ambiental en cultivos de verano a la disponibilidad hídrica (Andrade et al. 1996), (Sawchik y Ceretta, 2005).

En la agricultura de secano del país las deficiencias hídricas estivales son provocadas por factores que no admiten mayores transformaciones a través del manejo como son: la capacidad de almacenamiento de agua disponible (AD) de los suelos y principalmente un régimen de precipitaciones (PP) que, en general, en verano es deficitario en relación a las necesidades hídricas de los cultivos y además posee una elevada variabilidad en ocurrencia, intensidad y volumen.

Las deficiencias hídricas estivales provocan disminuciones en el rendimiento potencial de maíz y soja realizados en secano. Las pérdidas en rendimiento son altamente variables y dependen del comportamiento de las PP las que determi-

nan principalmente la disponibilidad de agua para los cultivos.

En estimaciones recientes, se indica que en la región agrícola del Litoral Sur las deficiencias de agua promedio en relación a las necesidades hídricas se sitúan en el entorno de 37% para maíz y 35% en soja (Giménez y García, 2009), siendo dichos cultivos los que presentan mayor diferencia entre la evapotranspiración real y de cultivo.

A nivel nacional, son escasos los antecedentes de trabajos científicos que hayan cuantificado las pérdidas en rendimiento debido a deficiencias hídricas y aún menores son las citas encontradas sobre el efecto de las deficiencias de agua en las diferentes etapas de desarrollo de los cultivos (Hofstadter, 1983).

La cuantificación de los efectos que provocan las deficiencias hídricas, en las diferentes etapas de desarrollo de los cultivos, presenta un problema metodológico debido a las características climáticas del país. En condiciones de PP variables resulta escasamente probable poder ejecutar tratamientos de deficiencias hídricas en las distintas etapas de desarrollo de los cultivos, determinados *a priori*, excepto en años con sequías extremas.

El conocimiento ajustado de las pérdidas en grano que ocurren a causa de las deficiencias hídricas en las diferentes etapas de desarrollo de maíz y soja, permitirá cuantificar el efecto del riego suplementario en estos cultivos y diseñar estrategias eficientes en el manejo del agua de riego.

El objetivo principal del trabajo fue cuantificar la respuesta en rendimiento con disponibilidades hídricas diferentes en las principales etapas de desarrollo de maíz y soja.

### 3.2. Materiales y métodos

Por los motivos ya señalados, la metodología experimental pretendió cambiar las condiciones hídricas variables que imponen las PP a través de la utilización de simuladores de sequía, parcelarios y móviles. Los mismos fueron contruidos en estructuras de hierro con cubiertas de lonas impermeables. Las dimensiones de los simuladores se adecuaron al tamaño de las parcelas, en maíz fueron de 3.5m x 5m x 2.5m y en soja de 2m x 5m x 1.5m.

Los artefactos de simulación fueron colocados, sobre las parcelas de cultivo en las que se definió controlar el agua, antes de cada evento de PP y retirados inmediatamente después de los mismos. Se intentó no provocar transformaciones significativas en las condiciones de radiación solar y temperaturas a las que estuvieron expuestos los cultivos en el campo.

Asimismo, se dispuso de un sistema de riego localizado, para agregar agua en el volumen y en la etapa de desarrollo definida, cada hilera de cultivo dispuso de una cinta de riego por goteo, con goteros cada 20cm, excepto en los tratamientos de secano.

El contenido hídrico del suelo fue monitoreado en forma periódica, las mediciones se realizaron con sonda de neutrones, desarrollando medidas cada 10cm de profundidad hasta 1m del perfil de suelo.

Se utilizaron pronósticos meteorológicos de corto plazo, para definir la colocación de los simuladores de sequía.

Se realizó un balance hídrico (BH) de suelo diario, de acuerdo a la siguiente fórmula:  $BH=R+PP-ETC$ , siendo  $R=mm$  agregados de agua de riego,  $PP=mm$  totales y  $ETC=mm$  de evapotranspiración de cultivo.

La información climática fue provista a partir de una estación meteorológica automática Vantage Pro 2TM, modelo 6510 (Davis Instruments, Hayward, CA), ubicada en la EEMAC.

Importa aclarar que la metodología descripta permitió realizar un control parcial de la disponibilidad hídrica en las diferentes etapas de desarrollo de los cultivos. Las particulares condiciones climáticas de la primavera-verano 2009-10 en las que predominaron los excesos de PP y los eventos climáticos extremos, particularmente vientos fuertes, afectaron la aplicación de la metodología experimental.

### 3.3. Resultados

Los resultados que se presentan a continuación son de carácter primario debido a que fueron obtenidos durante el primer año de ejecución del proyecto de investigación FPTA N° 261 en la temporada 2009-2010.

#### Maíz

En maíz se evaluaron 4 tratamientos (T) de disponibilidad hídrica durante las diferentes etapas de desarrollo del cultivo. Se distinguieron en el ciclo las etapas críticas para la determinación del rendimiento (PC) y las no críticas (PNC). Asimismo se trabajó con umbrales de AD en suelo diferenciados de acuerdo a la etapa de desarrollo, los T evaluados fueron los siguientes:

T1 = Bienestar hídrico. Contenido de agua en suelo durante el PC superior a 60% AD y en PNC superior a 40% AD.

T2 = Deficiencias hídricas en el PC. Contenidos de agua en suelo durante el PC inferior a 60% AD y durante PNC superior a 40% AD.

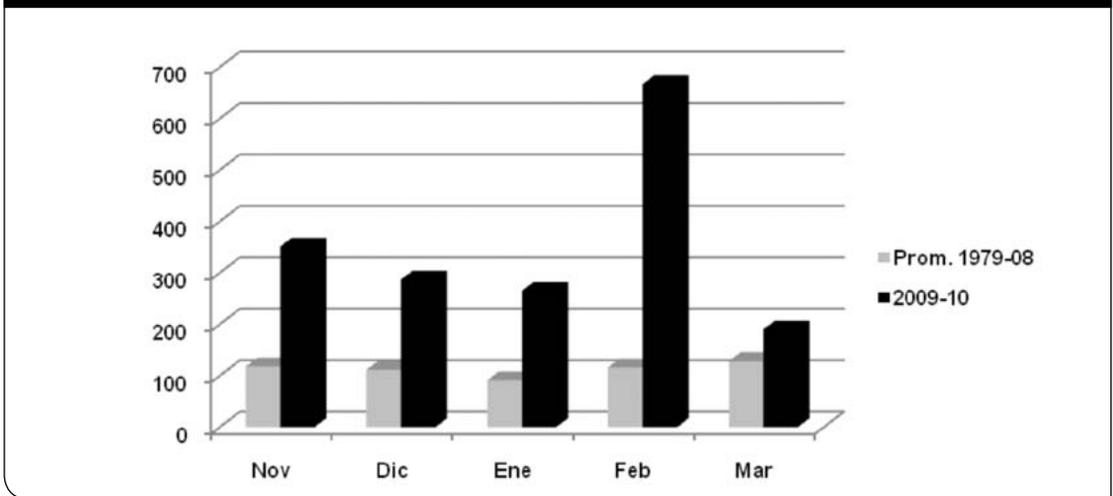
T3 = Deficiencias hídricas en PNC. Contenido de agua en suelo durante el PC superior a 60% AD y en PNC inferior a 40% AD.

T4 = Secano.

La duración del ciclo (emergencia-madurez) fue de 111 días y se ubicó entre el 11 de noviembre y 2 de marzo.

En la Figura 1, se muestran las PP mensuales entre noviembre y marzo del año de estudio y las PP promedio, durante esos meses, en los últimos 30 años, en Paysandú. Se observa que las PP del año de estudio fueron excepcionalmente superiores a las promedio. Las características de año 'Niño' provocaron excesos hídricos durante los meses en los que se desarrolló el cultivo.

**Figura 1:** Precipitaciones promedio Paysandú 1979-2008 y 2009-10



Las PP totales fueron de 1.549mm, importa resaltar la ocurrencia de 40 eventos de lluvias en el ciclo, el 36% de los días presentaron PP con la consiguiente disminución de la radiación solar incidente y de las temperaturas.

Las condiciones climáticas extremas afectaron el rendimiento potencial del maíz, básicamente por la falta de luz y la disminución de las temperaturas, factores de elevada significación en las tasas fotosintéticas de una especie de tipo metabólico C<sub>4</sub>.

Las condiciones descriptas determinaron que a través de la metodología propuesta no se logró controlar la disponibilidad hídrica durante el PNC anterior al PC o sea durante la etapa vegetativa del cultivo.

En cambio, fue posible controlar parcialmente, la disponibilidad de agua durante el PC ubicado en el entorno de la floración del maíz, definido entre los 15 días anteriores y 15 días posteriores del inicio de la floración femenina. Además, se controló la disponibilidad hídrica durante el PNC posterior al PC o sea durante la mayor parte de la etapa de llenado de grano.

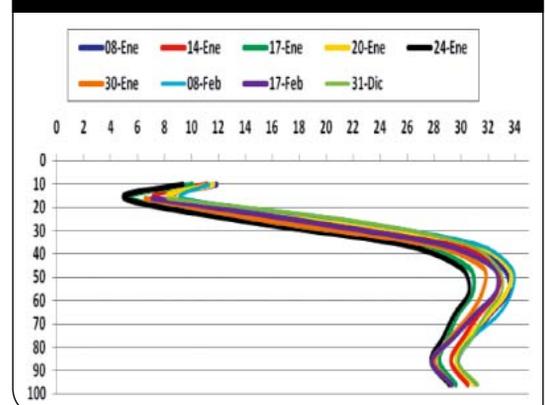
En la Figura 2 se muestra el contenido de agua en suelo en el T1, se observa una baja dispersión entre las mediciones realizadas en comparación con los restantes T evaluados y un contenido de agua en suelo elevado. Estos resultados indican que se logró cumplir el objetivo del T1 de acuerdo a la definición establecida de bienestar hídrico.

En la Figura 3, se presentan las mediciones de agua en el T2 con deficiencias hídricas durante el PC. Se constató mayor dispersión entre las diferentes mediciones de agua y un menor contenido hídrico durante el PC, en relación a los resultados del T1.

Se muestran en la Figura 4 los resultados de las mediciones de agua para el T3, en el que se provocaron deficiencias hídricas durante el PNC posterior al PC. Se visualiza un contenido hídrico mayor en las mediciones de agua realizadas durante el PC y una disminución notoria del agua en suelo en las mediciones posteriores al PC, los resultados se ajustan a la definición del T3.

En la Figura 5, se aprecia la evolución del agua en el T4, en el que no hubo intervenciones en

**Figura 2:** Contenido de agua en suelo (% vol) en t1 medido cada 10cm de suelo.



relación al contenido de agua, por ser el T en secano. Se constata una gran dispersión entre las medidas, no obstante las elevadas PP ocurridas durante el ciclo, la distribución de las mismas

presentó igualmente etapas con altos y bajos contenidos de agua en suelo.

### Producción de materia seca

De acuerdo a las PP del año de estudio y los inconvenientes climáticos ocurridos, la metodología propuesta durante la etapa vegetativa no permitió controlar adecuadamente las PP y los diferentes T presentaron contenidos de agua en suelos elevados y similares.

En la Figura 6, se presentan los resultados de la evolución de deposición de materia seca en los diferentes T evaluados. Los tres primeros muestreos realizados de MS, coinciden aproximadamente con la ubicación del PC que ocurrió entre el 23 de diciembre y el 23 de enero.

Los T evaluados incrementaron la deposición de MS entre el primer y tercer muestreo, sin embargo se aprecian diferencias notorias en el crecimiento.

Mientras en el T2 con aplicación de simulador de sequía durante el PC, se presentó un incremento de MS entre los muestreos indicados de 6739 Kg/ha, en los T sin simulador los incrementos en MS fueron de 9886 Kg/ha para el T1, 10650 Kg/ha en el T3 y 11218 Kg/ha en el T4.

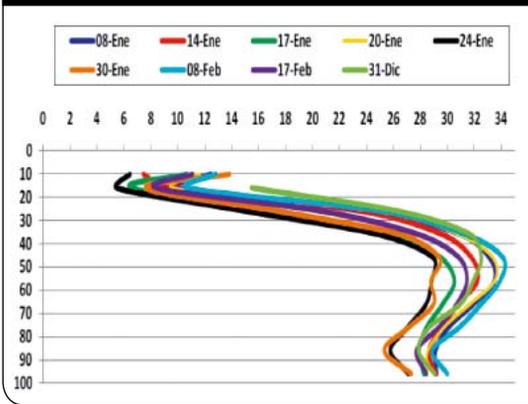
En el Cuadro 1, se muestran las tasas de crecimiento de cultivo (TCC) promedio y las tasas de crecimiento de planta individual (TCP) promedio obtenidas durante el PC, en los T evaluados.

Se observa que los valores de TCC y TCP logrados en T1 y T3, son elevados, sin embargo son menores que las TC logradas en trabajos anteriores en maíz en la localidad (Roselli y Texeira, 1998), el comportamiento mencionado es consecuencia de las condiciones limitantes de luz del año de estudio.

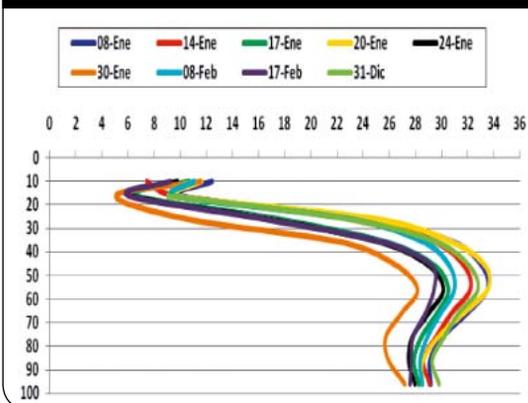
En el caso del T2 la TCC y la TCP son bajas a causa de las deficiencias provocadas durante el PC. En relación a la TCP es también baja, no obstante superior al umbral para fijar grano en la especie que de acuerdo a Andrade et al. 2000, se ubica en valores del orden de 1 a 1.4 grs/pl/día con variaciones de acuerdo al material genético.

En el T4 tanto las TCC y TCP promedio, son similares a las de los T sin deficiencias hídricas durante el PC, debido a que las PP del año determinaron la existencia de disponibilidades hídricas suficientes para el T de secano.

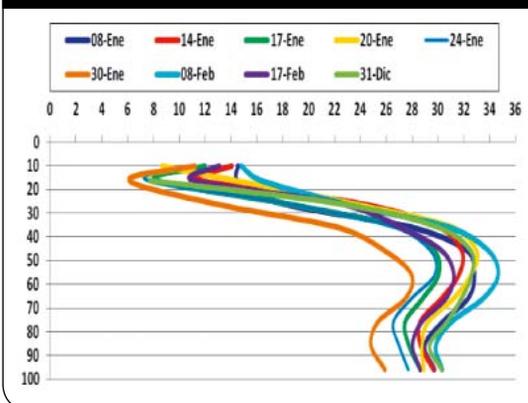
**Figura 3:** Contenido de agua en suelo (% vol) en T2 medido cada 10cm de suelo.



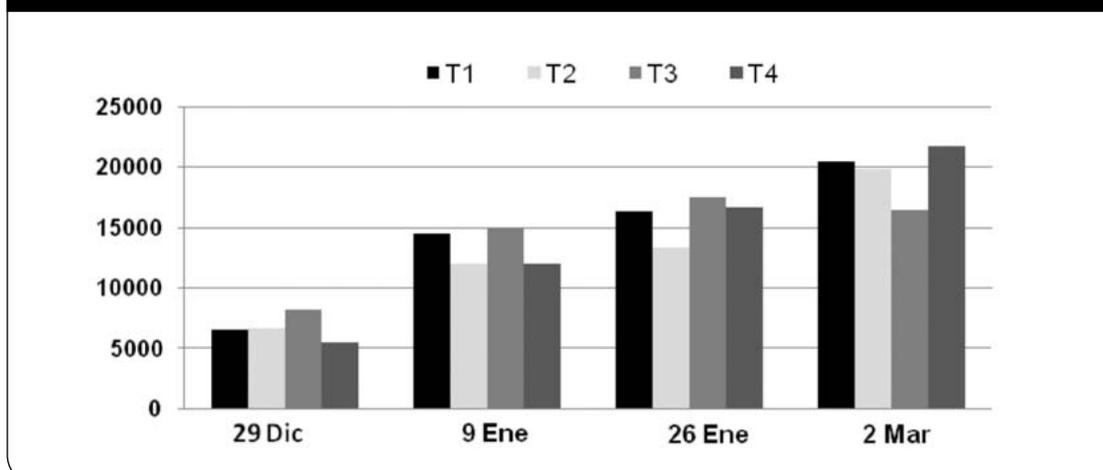
**Figura 4:** Contenido de agua en suelo (% vol) en T3 medido cada 10cm de suelo.



**Figura 5:** Contenido de agua en suelo (% vol) en T4 medido cada 10cm de suelo.



**Figura 6:** Evolución de la materia seca aérea (Kg/ha) en maíz



**Cuadro 1.** Tasas de crecimiento de cultivo y de planta en maíz

	TCC (Kg/ha/día)	TCP (grs./pl./día)
T1	353	3.3
T2	241	2.2
T3	380	3.3
T4	401	3.5

**Cuadro 2.** Componentes del rendimiento en maíz

	Nº granos m <sup>2</sup>	Peso 1000 granos (g)
T1	4477	292
T2	2343	286
T3	4231	223
T4	4465	278

Entre el 24 de enero y 28 de febrero se ubicó aproximadamente la mayor parte de la etapa de llenado de grano, durante esta etapa los simuladores de sequía se ubicaron sobre el T3 provocando deficiencias hídricas en este T, en cambio los T1 y T2 no presentaron restricciones hídricas en dicha etapa.

En la Figura 6, se observa que en el muestreo del 2 de marzo los T1 y T2 continuaron depositando MS, mientras que el T3 no sólo detuvo la deposición de MS, sino que disminuyó la MS aérea depositada, en relación al muestreo anterior. Este comportamiento, se debe a que en las etapas avanzadas del cultivo, las deficiencias hídricas provocan la muerte de hojas en maíz, por esa razón la MS disminuyó en el T3 entre los muestreos indicados.

### Componentes del rendimiento

En el Cuadro 2, se muestran los resultados del ensayo en relación a los componentes principales del rendimiento en maíz, en los diferentes T

evaluados. Se constató que los T1 y T3 presentaron un Nº de granos/m<sup>2</sup> elevado y muy superior a los valores obtenidos en el T2. De acuerdo a los resultados mostrados anteriormente, el T2 presentó una menor TCC durante el PC la cual fue determinante del Nº de granos fijados por superficie.

Las deficiencias hídricas provocadas durante el PC disminuyeron el 48% el Nº de granos fijados, en relación al T1 sin deficiencias hídricas.

En relación al peso promedio de grano, en el T3 que fue sometido a deficiencias hídricas en la etapa de llenado de grano se obtuvo el menor peso de grano con diferencias notorias con el T1. El peso de grano en maíz es un componente del rendimiento residual y en general no determinante del mismo.

Las deficiencias hídricas en la etapa de llenado de grano, provocadas en el T3 disminuyeron en 24% el peso de grano promedio en relación al obtenido en T1.

## Rendimiento en grano

En la Figura 7, se muestran los rendimientos logrados en los T evaluados en maíz. Se aprecian diferencias estadísticas significativas entre el T2 con el T1 que no presentó deficiencias de agua durante el ciclo.

En el caso del T3 con deficiencias provocadas sólo durante el llenado de grano, mostró un comportamiento intermedio en rendimiento, no detectándose diferencias significativas con los restantes T evaluados, pero sí una tendencia fuerte a obtener rendimientos superiores a T2 e inferiores a T1 y T4.

Se constató que los T que presentaron disponibilidades hídricas elevadas durante el PC permitieron obtener altas TCC promedio durante ese periodo, las cuales fueron determinantes para lograr un elevado N° de granos por superficie. Los mayores rendimientos en grano dependen de obtener un alto N° de granos/m<sup>2</sup>, (Andrade et al. 1996).

El T2 que como se indicara presentó bajas TCC durante el PC y como consecuencia un escaso N° de granos/m<sup>2</sup>, mostró los menores rendimientos, no obstante, la mejores condiciones hídricas de este T durante la etapa de llenado de grano. Los resultados confirman la reducida capacidad para compensar un bajo N° de granos con el mayor peso de los mismos que presenta la especie.

La disminución del rendimiento en grano provocada por deficiencias hídricas durante el PC fue de 6.387 Kg/ha, o sea las pérdidas fueron del 48% del rendimiento potencial obtenido en el T1.

Las pérdidas en rendimiento por deficiencias de agua durante el llenado de grano fueron de 4.048 Kg./ha e implicaron una disminución del 31% en relación al rendimiento logrado en el T1.

El T4 debido a las condiciones hídricas del año mostró altas TCC durante el PC, las cuales permitieron obtener un N° de granos por superficie elevado. Durante la etapa de llenado de grano la disponibilidad hídrica se mantuvo y como consecuencia los rendimientos fueron elevados, no presentando diferencias significativas con el T1.

## Soja

En soja de acuerdo a las condiciones climáticas del año ya comentadas fue posible evaluar 3 tratamientos de disponibilidad hídrica, denominados de la siguiente forma:

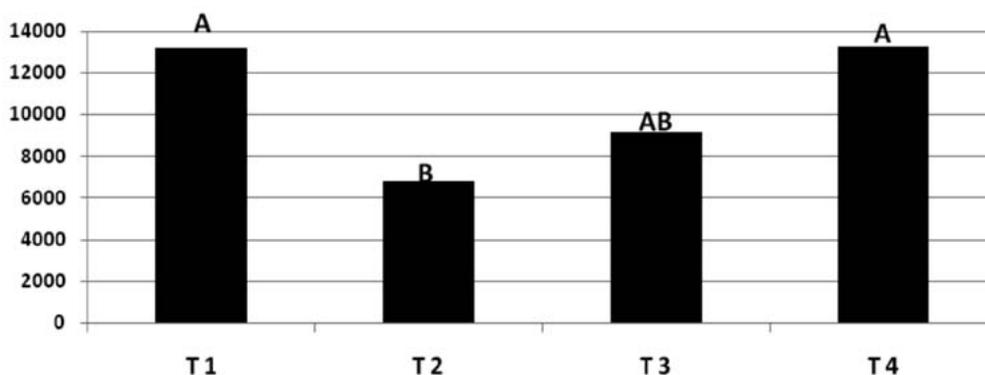
T1 = Bienestar hídrico. Contenido de agua en suelo durante el PC superior a 60% AD y durante el PNC posterior al PC, superior a 40% AD.

T2 = Deficiencias hídricas en el PC. Contenidos de agua en suelo durante el PC inferior a 60% AD y durante PNC posterior al PC, superior a 40% AD.

T3 = Secano

Las condiciones climáticas del año de estudio provocaron que durante la etapa vegetativa y las primeras etapas reproductivas R1 y R2 (Ferh y Caviness, 1977), el contenido hídrico del suelo en los T evaluados fue similar y sin deficiencias hídricas.

Figura 7: Rendimiento (Kg/ha) en grano de maíz



\* Letras distintas indican diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ )

La duración del ciclo (emergencia-cosecha) fue de 114 días, y se ubicó temporalmente entre el 14 de diciembre y el 7 de abril.

Las PP totales fueron de 1.331mm con 28 eventos de lluvia, aproximadamente el 25% del ciclo del cultivo presentó PP con consecuencias similares sobre la radiación solar y las temperaturas a las comentadas para maíz.

En la Figura 8, se presentan los resultados de los muestreos de agua en suelo realizados durante el período más crítico (Kantolic et al. 2003) de determinación del rendimiento en soja entre los

estadios R4 y R6, ubicado temporalmente entre el 10 de febrero y 10 de marzo.

Se observa en el T1 una baja dispersión entre las medidas realizadas y el contenido de agua en suelo, es el más elevado de los T evaluados.

En el T2 se visualiza también una baja dispersión entre las mediciones de agua y en este caso es el T que presentó menor disponibilidad hídrica durante el PC.

El T3 muestra la mayor dispersión entre medidas y el comportamiento se debe obviamente a la falta de control en la disponibilidad hídrica por ser el tratamiento de secano.

En la Figura 9, se muestra la evolución de la MS en los tres muestreos realizados durante el PC. En el muestreo del 27 de enero, los T evaluados muestran una deposición de MS similar, como se indicara las disponibilidades hídricas durante la etapa vegetativa fueron elevadas en los 3 T evaluados.

Cabe indicar que entre el 19 y 22 de febrero hubo PP acumuladas del orden de 225mm que en el T2 se lograron contener mayormente a través de los simuladores de sequía.

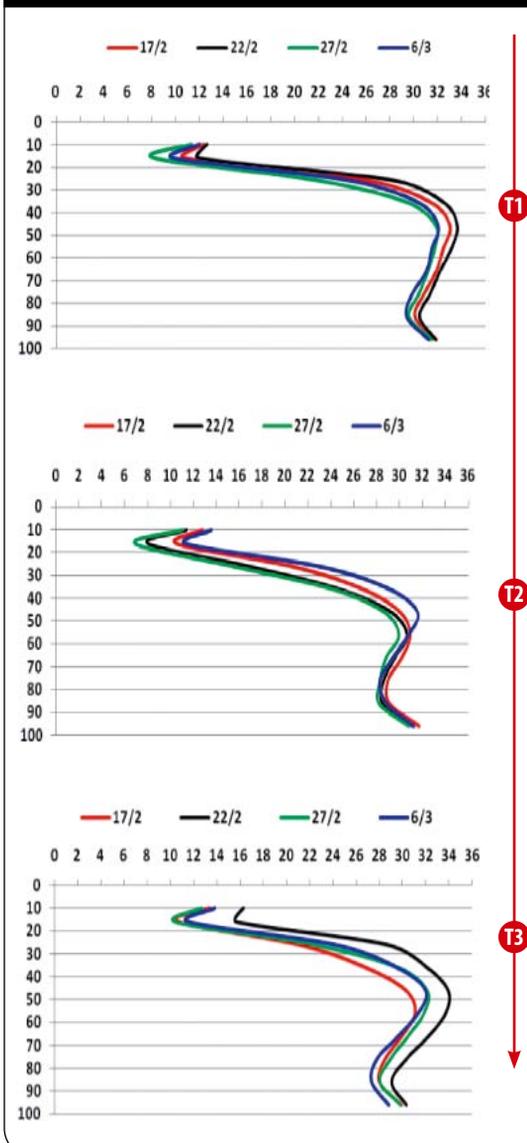
En el segundo muestreo de MS del 24 de febrero, se presentaron diferencias entre T1 y T2 del orden de 2665 Kg/ha a favor del T1, las cuales implican en el T2 una deposición de MS 32% menor a causa de las deficiencias hídricas provocadas durante el PC. Este efecto de menor crecimiento de soja se debe a la diferencia entre la disponibilidad hídrica y las necesidades de agua del cultivo.

En el tercer muestreo de MS que se realizó a fines del PC, la diferencia en MS entre T1 y T2 se amplió a 3.650 Kg/ha, en definitiva 47% menos de deposición de MS entre los T con y sin deficiencias hídricas durante el PC.

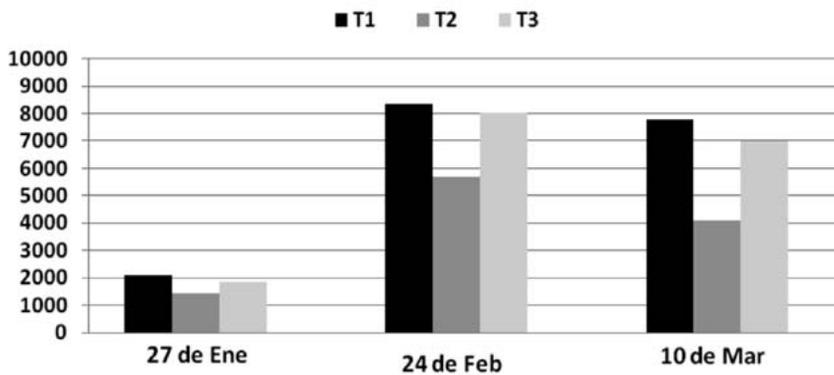
En el caso del T3 debido a las condiciones hídricas del año la producción de MS fue similar a la del T1 en los muestreos analizados.

En la Figura 10 se muestra la materia seca aérea depositada durante las etapas R2 y R6 de soja, se destaca el crecimiento durante este periodo de 5.700 Kg/ha en el T1 y 2.200 Kg/ha en el T2.

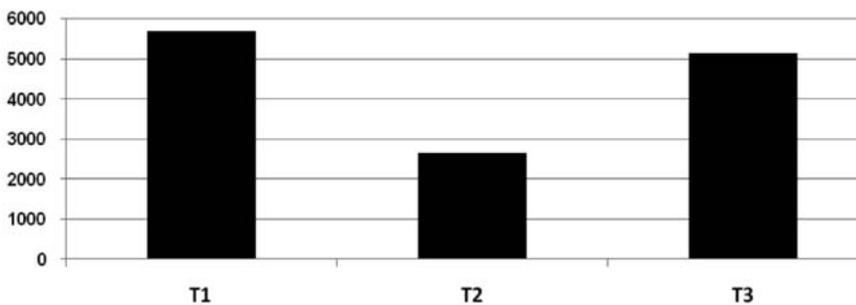
**Figura 8:** Contenido de agua en suelo (% vol.) en mediciones cada 10 cm de profundidad en t1,t2 y t3.



**Figura 9:** Evolución de la MS (Kg/ha) en soja



**Figura 10:** Materia seca (Kg/ha) aérea depositada durante el pc en soja



### Componentes del rendimiento

En el Cuadro 3, se muestran los resultados obtenidos en los principales componentes del rendimiento de soja.

**Cuadro 3.** Componentes del rendimiento en soja

	Nº granos m <sup>-2</sup>	Peso 1000 granos (g)
T1	2474	198
T2	1195	197
T3	2592	190

En el N° de granos/m<sup>2</sup> se presentan diferencias entre T1 y T2, se observa una clara respuesta del cultivo a la disponibilidad hídrica durante el pc. El T1 permitió altas TCC que habilitaron a fijar un N° de granos/m<sup>2</sup> claramente superior al T2.

El T3 debido a las condiciones hídricas del año no presentó deficiencias de agua durante el pc

concretando un alto N° de granos/m<sup>2</sup>, no se detectaron diferencias entre T1 y T3.

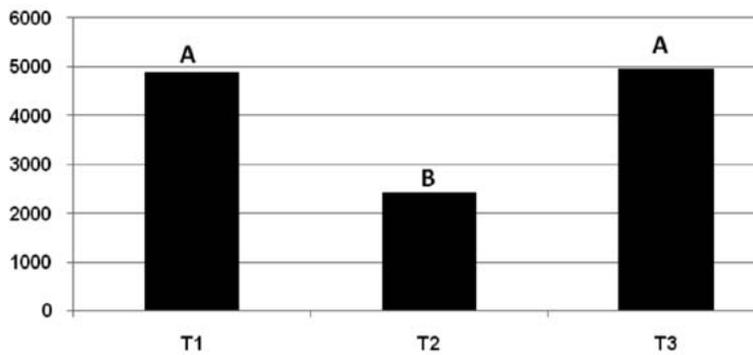
En relación al peso promedio de los granos, no hubo diferencias entre los T evaluados. Las deficiencias hídricas provocadas entre R4 y R6 en el T2, afectaron solo el N° de granos/m<sup>2</sup>.

### Rendimiento en grano

En la Figura 11, se muestran los rendimientos obtenidos en los diferentes T evaluados en el ensayo. Se observa claramente las diferencias significativas entre T1 y T2 por causa de las deficiencias hídricas provocadas durante el pc de determinación del rendimiento. El bajo N° de granos por superficie del T2 es responsable de la disminución del rendimiento en grano. Las escasas TCC durante el pc afectaron en forma negativa la fijación de granos.

Las deficiencias de agua provocadas durante el pc en el T2 significaron diferencias en el rendimiento de 2.449 Kg/ha con el T1, esto repre-

**Figura 11:** Rendimiento en grano de soja



\* Letras distintas indican diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ )

senta una disminución de 50% del rendimiento potencial de soja.

### 3.4. Consideraciones finales

Los resultados principales de los experimentos de maíz y soja se explican a través de un enfoque eco-fisiológico de la producción de granos. Las TCC durante el PC establecen las condiciones para fijar el N° granos/m<sup>2</sup> que es el componente principal del rendimiento en grano. Para lograr altas TCC durante el PC que permitan por consiguiente la sobrevivencia de un N° de granos/superficie elevado, es necesario disponer de altos contenidos hídricos de suelo durante el PC.

Los resultados primarios obtenidos indican que las deficiencias hídricas solo durante el PC provocaron pérdidas de rendimiento en maíz

de 6.387 Kg./ha y en soja de 2.449 Kg/ha, esto implicó el 48 y 50% del rendimiento potencial respectivamente, en un año agrícola afectado significativamente por la falta de luz.

En maíz las deficiencias hídricas durante la etapa de llenado de grano significaron altas pérdidas de rendimiento del orden de 4.048 Kg/ha, esto implicó una disminución de aproximadamente el 30% del rendimiento potencial.

**Agradecimientos:** El autor desea agradecer al INIA por financiar el proyecto FPTA 261, a los tesistas Juan Pablo Grasso, Joaquín Grasso y Agustín Montero, al becario de investigación Richard Arévalo y también a Matías y a Gerónimo Giménez, sin cuyo esfuerzo en los ensayos de campo hubiera sido imposible obtener los resultados logrados.



# 4. Riego suplementario en cultivos extensivos, panorama de Argentina y experiencia en la región central del país

I. A. Salinas

Ignacio Aquiles Salinas: INTA Manfredi, Argentina.

Contacto: [aquilessalinas@gmail.com](mailto:aquilessalinas@gmail.com)

## 4.1. Introducción

La mayor parte de la producción agropecuaria en la República Argentina, se desarrolla en ambientes subhúmedos o semiáridos, por lo que uno de los principales factores que limitan la producción o generan una importante variabilidad interanual en los rendimientos, es la escasez e inadecuada distribución de las precipitaciones. El riego se convirtió entonces en la principal tecnología agropecuaria que permite revertir y/o atenuar estos problemas potenciando además las condiciones edafoclimáticas de cada área donde se lo utiliza.

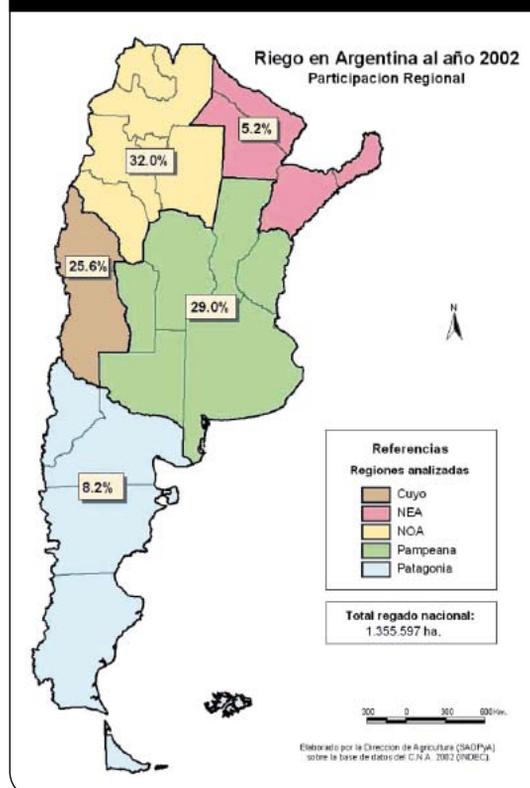
## 4.2. Panorama en Argentina

A nivel oficial no existe información actualizada para conocer la evolución de la superficie regada, lo más contemporáneo, son los resultados del censo nacional agropecuario 2002, que muestra una superficie regada a nivel nacional de 1.356.000 ha, lo que representaba un 0,49 % del territorio nacional, en la Figura 1 se observa como está distribuida la participación porcentual del riego en las distintas regiones del país. Según la publicación “Una estrategia para el manejo integrado del agua para riego en Argentina” (BID-Prosap) el área bajo riego en el 2005 ascendía a 1.810.000 ha. De esta superficie, prácticamente el 70 % corresponde a los sistemas de riego gravitacionales (Figura 2), donde provincias como Mendoza, Salta y Jujuy tienen la mayor superficie con este sistema de riego. El otro sistema que tiene gran desarrollo y que sigue incrementando su superficie, es el de aspersión, con una participación (2002) de aproximadamente el 21% del área. Resultados del cen-

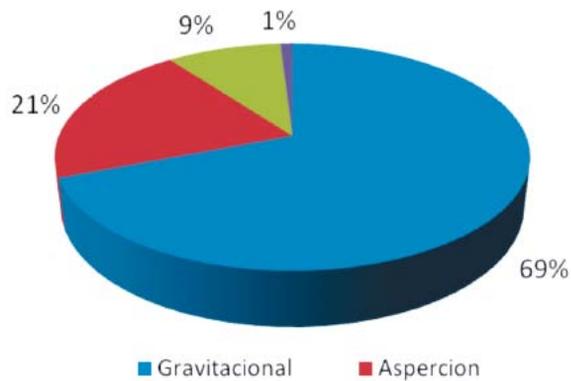
so, indican que la tasa de crecimiento anual del área bajo riego nacional es del 2,7%.

En la provincia de Córdoba, de acuerdo al censo 2002, la superficie bajo riego era de 93.835 ha. Si bien no se tiene información del crecimiento de riego en todas sus modalidades, los trabajos realizados por INTA Manfredi junto al consorcio de regantes, indican que el riego por aspersión en cultivos extensivos pasó de 56.000 ha aproximadamente (censo 2002) a 130.000 ha a fines del 2008 (INTA Manfredi datos no publicados), lo

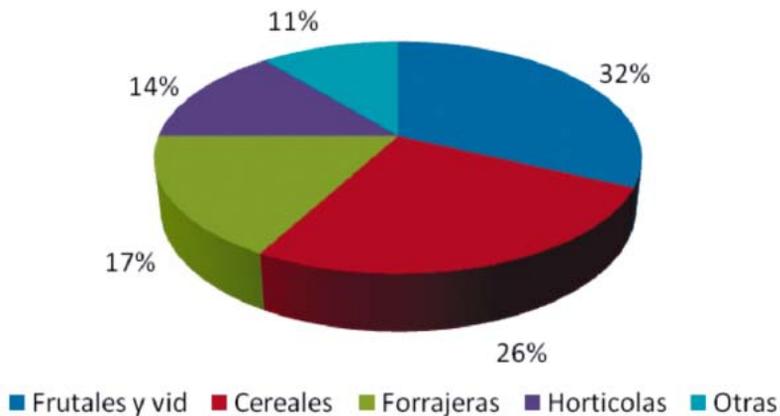
**Figura 1:** Argentina. Participación por regiones al año 2002. Participación relativa en porcentaje (%).



**Figura 2:** Argentina. Sistemas de riego al año 2002. Participación relativa en porcentaje (%).



**Figura 3:** Argentina. Cultivos regados al año 2002. Participación relativa en porcentaje (%).



que muestra un incremento de más de un 200% en el plazo de 7 años (2002-2008).

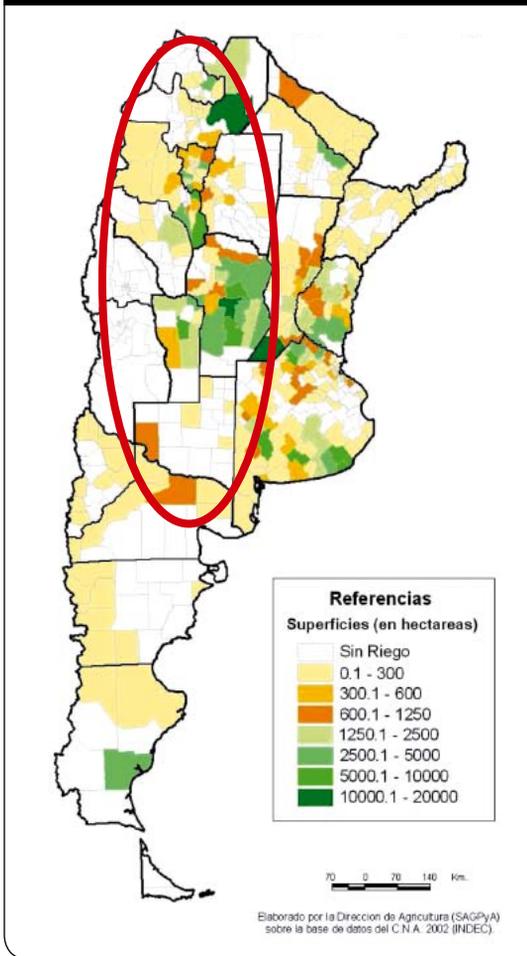
Los cultivos que predominantemente se riegan según el censo, son frutales y vid en un 32%, seguidos por cereales 25,7% el resto corresponde a forrajeras 17%, hortalizas 13,7% y forestales (Figura 3); aunque según BID – Prosap se observa en la actualidad un incremento no registrado de cereales y oleaginosas que alcanzaría una superficie cercana al 30%.

A nivel nacional, el riego por aspersión es el sistema más adoptado para regar cultivos extensivos, la distribución del área se ubica en la zona central del país (Figura 4), debido a que el riego gravitacional y localizado se concentra principalmente al Oeste, y en la zona del NEA por ser climáticamente más húmeda, no hay tanta difusión del riego ya que cola-

bora solo con el 5% del área regada con este sistema.

Si analizamos la variabilidad en la venta de equipos importados de aspersión (fuente Aduana) como un indicador del crecimiento de esta tecnología, vemos una tendencia creciente en la superficie que ha incorporado al riego pero con grandes altibajos debido a varios factores (políticos, socio-económicos, empresariales, etc.). Durante la crisis económica de los años 2001-2002, las ventas cayeron lo que provocó una fuerte retracción en la tasa de crecimiento del área regada, pero luego con la situación económica actual y los resultados productivos obtenidos tanto a nivel experimental como a nivel de productor, motivaron nuevamente el interés por esta tecnología, por lo que es de esperar que se llegue a los valores de los años 1996-1997 (Figura 5) lo que generará que el área bajo riego siga incrementándose.

**Figura 4:** Argentina. Distribución de la superficie con riego por aspersión año 2002.



### 4.3. Evolución del riego suplementario en la provincia de Córdoba

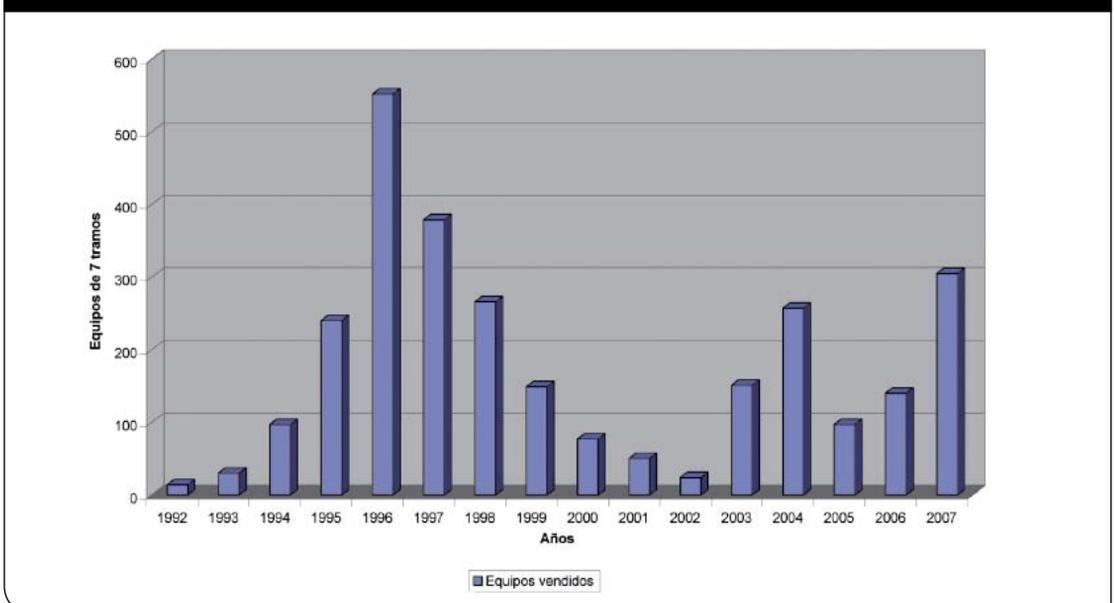
Tal como ocurrió en otras provincias, en Córdoba a mediados de 1990 comenzó un crecimiento importante en el uso del riego suplementario en cultivos extensivos. Muchas fueron las razones que confluyeron para esto, entre otras la revalorización de los campos, el aumento en el precio de los commodities y un ajuste en el manejo de las tecnologías que aseguraba el éxito productivo y económico.

El INTA jugó un rol muy importante en este crecimiento ya que trabajó tanto en lo organizacional (formación de consorcios, modificación de leyes, etc.) como en lo experimental, acompañando ese crecimiento junto a los productores y organizaciones públicas y privadas que trabajan en la temática.

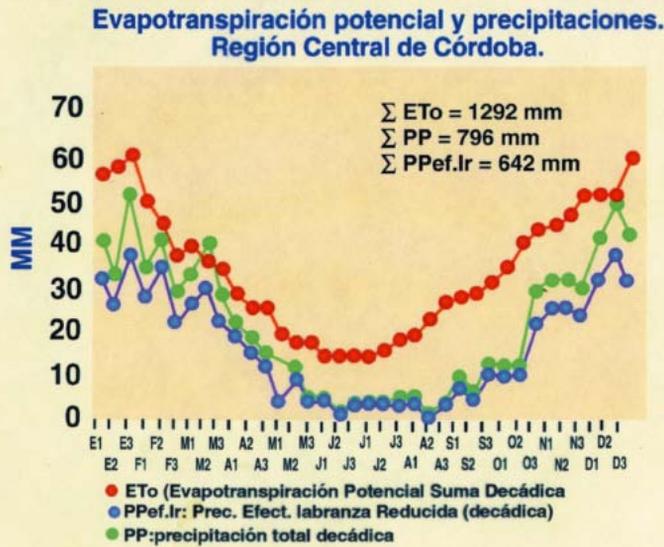
#### *Caracterización ambiental*

La principal limitante que condiciona la producción y sustentabilidad de la empresa agropecuaria en la mayor parte del territorio provincial, son las deficiencias hídricas y la marcada variabilidad en su distribución a través del año. La Figura 6 muestra la distribución de las precipitaciones medias a lo largo del año para la localidad de Manfredi (centro de la provincia), donde observamos un déficit marcado durante casi

**Figura 5:** Argentina. Cantidad de equipos de 7 tramos vendidos por año (fuente Aduana).



**Figura 6:** Córdoba. Distribución anual de precipitaciones vs evapotranspiración de cultivo en Manfredi.



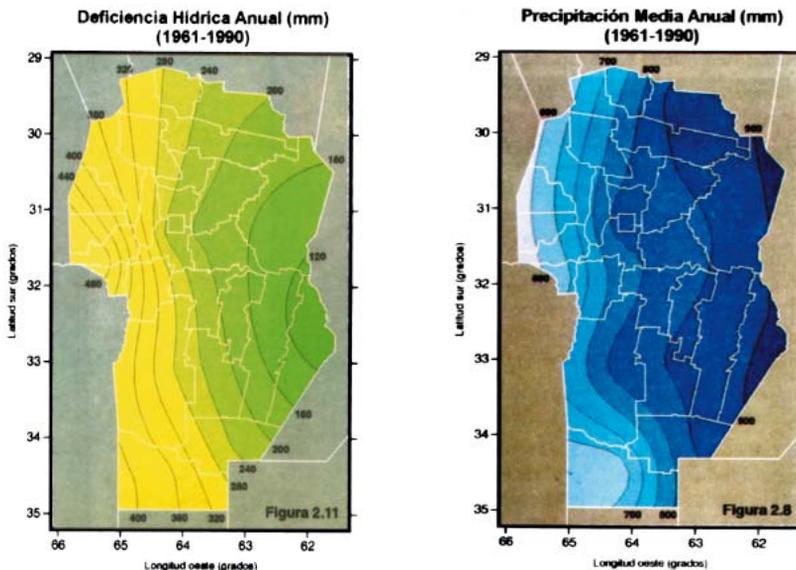
todo el año (diferencia entre evapotranspiración del cultivo y aporte de lluvias) afectando principalmente los cultivos de invierno como el trigo.

Si bien los datos informados corresponden a la localidad de Manfredi, existe en la provincia de Córdoba una variación importante en las precipitaciones que disminuyen de Este a Oeste generando deficiencias hídricas como se pueden apreciar en la Figura 7.

**La calidad de agua y suelos definen la superficie bajo riego y su distribución**

En la provincia de Córdoba, los proyectos de riego por aspersión se desarrollaron utilizando agua subterránea provenientes de perforaciones privadas. El área de la provincia con mayor densidad de perforaciones es la zona Central y Noreste (Figura 8), donde se obtiene agua de calidad, con buenos caudales, y se riegan suelos de

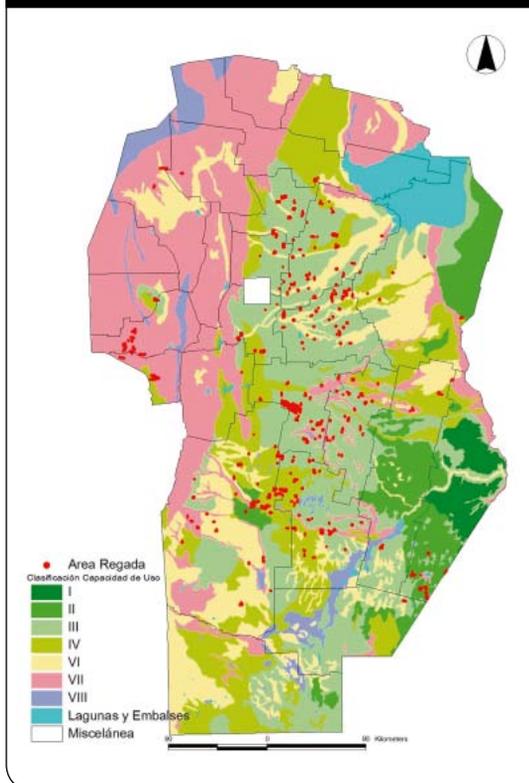
**Figura 7:** Córdoba. Precipitaciones anuales medias y deficiencia hídrica en la provincia.



buena aptitud agrícola. En la Figura 8 se observan los círculos de riego por pivó central (puntos rojos) identificados a través de imágenes satelitales (convenio INTA-CONAE) que permiten determinar el área bajo riego y su evolución a través del tiempo.

De acuerdo a los datos aportados por el INTA Manfredi, en general las aguas utilizadas para riego y los suelos que se están regando, no presentan limitaciones importantes.

**Figura 8:** Provincia de Córdoba. Distribución del los equipos de riego a nivel provincial en función de mapa de capacidad de uso de los suelos. (Fuente convenio INTA- MAGYRR).



La difusión del riego suplementario, está condicionada, a la disponibilidad de aguas de calidad apropiada y caudales suficientes, en combinación con suelos aptos que justifiquen, con buenos rendimientos, las inversiones de implementación y mantenimiento que esta tecnología requiere.

### **Necesidades de riego de los cultivos**

En la provincia de Córdoba, la cantidad de agua aplicada en los principales cultivos (trigo, soja

y maíz), varía según la localidad, aumentando desde el centro Sur, con unos 180mm/ha año promedio, hasta alcanzar cerca de 400mm/ha año en el noroeste provincial, milimetraje relacionado con las de precipitaciones y déficit hídricos de cada región (Figura 7).

Aunque con variaciones según zona y año, se puede estimar para la secuencia trigo/soja 2º maíz primera (tres cultivos en dos años), una necesidad anual de riego de 250 a 300mm.; es decir 2.500 a 3.000m³ ha/año. En el Cuadro 1 se muestra los milímetros aplicados a cada cultivo.

**Cuadro 1:** Córdoba. Lámina media aplicada por cultivo en la EEA Manfredi.

CULTIVO	(mm)
TRIGO	200
SOJA 1º	120
SOJA 2º	87
MAIZ 1º	118
MAIZ 2º	90

Rendimientos obtenidos en el módulo experimental y de capacitación en riego suplementario de la EEA INTA Manfredi 1996-2009

Desde el año 1996 el INTA Manfredi en su módulo demostrativo de experimentación y capacitación bajo riego suplementario, y en campo de productores regantes demostrativos, viene realizando experiencias de manejo de donde surgen las recomendaciones técnicas que luego difunde por diferentes medios.

El módulo demostrativo, tiene un equipo de pivóte central transportable de 5 tramos y voladizo, que riega una superficie de 30ha. El agua es suministrada por una perforación, que posee una electrobomba sumergible, con un caudal de 140.000 litros/hora.

Se conducen, con fines comparativos, dos secuencias de cultivos:

- Secuencia A - Trigo / Soja 2º - Maíz 1º
- Secuencia B - Trigo / Maíz 2º - Soja 1º

En ambas secuencias, se realizan tres cultivos cada dos años; en el caso del trigo, en todas las

**Cuadro 2:** Manfredi: resultados del análisis químico de suelo.

Profundidad (cm)	M.O. (%)	N total (%)	pH	CE (dS/m)	P (ppm)
0 – 20	2,10	0,125	6,20	0,6	30
20 – 40	1,35	0,089	6,70	0,7	13

campañas, se siembra sobre maíz y sobre soja. Los cultivos se manejan en un sistema de siembra directa continua desde el inicio del módulo.

El suelo del lote regado pertenece a la serie Oncativo, es un Haplustol éntico, profundo, bien drenado, desarrollado sobre materiales loésicos franco limosos, que ocupa las lomas casi planas, muy extendidas, con pendientes que no superan el 0,5%. Es el suelo más representativo del área, que conjuntamente con otras series de similar aptitud ocupa una importante superficie en la región central de Córdoba. A nivel químico (Cuadro 2) es un suelo de reacción ligeramente ácida (no limitante) y no salino. Moderado contenido de materia orgánica y nitrógeno total y bien provisto de fósforo asimilable.

En cuanto a la calidad del agua utilizada puede considerarse como de regular a buena. Los resultados de algunos de los elementos del análisis se observan en el Cuadro 3 que sigue a continuación.

**Cuadro 3:** Manfredi: resultados del análisis químico de agua.

Conduct. Elect. (dS/m)	Sales totale (g/l)	RAS ajustado
1,067	0,683	7,9

Del análisis se determina que la concentración de sales totales es de 700 mg/litro y la relación de absorción de sodio (RAS AJ – FAO 1992) es 7,9. De acuerdo a esos valores, su utilización en forma continua implica de un bajo a mediano riesgo de salinización y mediano de sodificación (disminución de permeabilidad) del suelo.

### Manejo del cultivo

Las medidas de manejo y las tecnologías aplicadas en los cultivos apuntan a lograr el máximo rendimiento económico, manteniendo y mejorando la sustentabilidad del sistema productivo,

incrementando los rendimientos por una mejora en la eficiencia en el uso de los insumos (fertilizante, semilla, agua, etc.).

Se realizan ensayos de experimentación para: determinar las densidades óptimas de siembra, seleccionar los cultivares o híbridos más destacables, determinar el distanciamiento entre hileras óptimas, la fecha de siembra adecuada, el cultivo antecesor, etc.; analizando cada una de estas variables en forma individual o en combinación con las otras.

### Manejo de la fertilización

La estrategia de fertilización consiste en la reposición de los principales macro nutrientes (nitrógeno y fósforo) extraídos por los cultivos, manteniendo y/o mejorando las condiciones físico, químicas y biológicas de los suelos bajo riego.

El fósforo se aplica a la siembra localizado o al voleo, en dosis de mantener niveles de suficiencia, ya que por los valores actuales, no existe respuesta en rendimiento a su aplicación.

No se fertiliza con azufre debido a que el agua de riego contiene altos niveles de sulfatos, de manera que milímetros aplicados superan ampliamente la demanda de los cultivos.

La fertilización nitrogenada, se realiza de acuerdo a:

Análisis de suelo, previo a la siembra; para determinar: fertilidad actual y potencial.

Rendimientos esperados en función de los potenciales del área.

Requerimientos totales del cultivo y parciales según estado fenológico.

Los ensayos experimentales con nitrógeno apuntan a: evaluar diferentes fuentes de nutrientes, a la determinación de dosis óptima, a

conocer los momentos de aplicación, a mejorar la respuesta en la calidad del grano.

### Manejo del riego

El agua es un elemento fundamental en la vida y para la producción, su uso (mal uso) será cada vez más cuestionado por ser un recurso que se comparte con la población y la industria. En INTA Manfredi durante muchos años hemos trabajado básicamente en definir una estrategia de riego que permita asegurar que el agua no sea limitante en la búsqueda de la producción potencial de los cultivos. Los resultados nos llevaron a difundir la técnica de Balance Hídrico como la herramienta más recomendable para definir los momentos y las láminas de riego para cada cultivo. Este balance tiene en cuenta los siguientes aspectos:

Determinación de la reserva de agua útil en el suelo, medida por métodos gravimétricos.

Demanda de agua (Evapotranspiración de referencia o potencial) según valores climáticos registrados durante el ciclo de los cultivos.

Necesidades de agua del cultivo según valores climáticos (temperatura y radiación solar) y estado fenológico (vegetativo, macollaje, encañazón, espigazón y llenado de granos)

Límite mínimo aceptable (umbral) de agua útil en el suelo, según cultivo y estado fenológico.

Lluvias efectivas (milímetros de agua realmente infiltrados según registros pluviométricos diarios corregidos por un coeficiente de aprovechamiento).

En forma paralela se trabaja en otra serie de ensayos que apuntan a: mejorar la eficiencia en el uso del agua (kg grano/mm consumido), buscando incluso restringir el aporte de agua en algunas etapas específicas del cultivo, al estudio y validación de instrumentos de medición indirecta (*sondas diviner, enviorscan, aquaspy*) o software específicos.

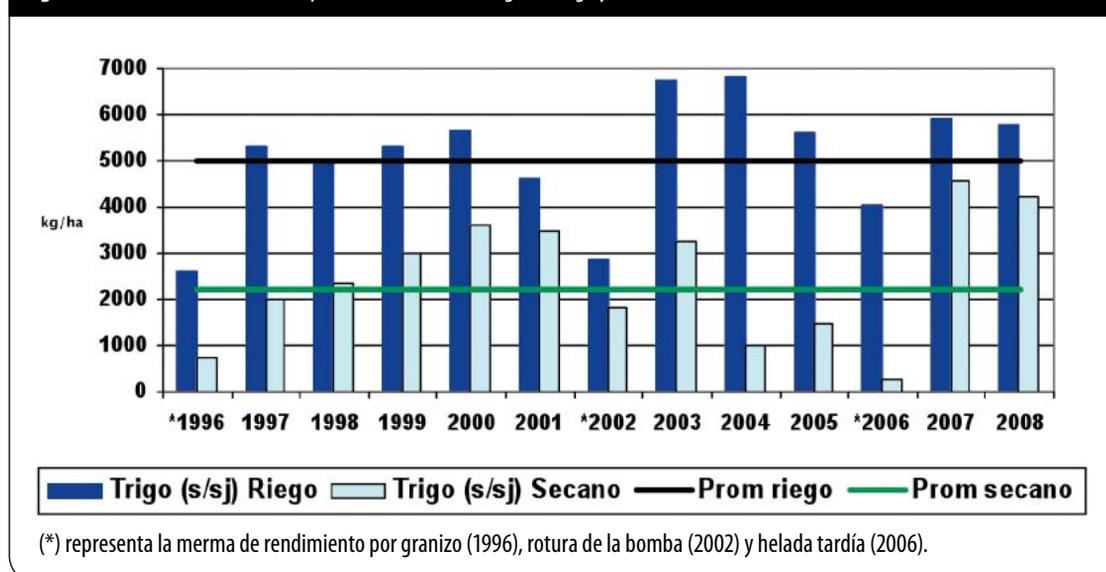
### Resultados productivos

Las mejoras que se han obtenido en los rendimientos en la EEA. Manfredi, son muy importantes como se puede observar en los cuadros de rendimientos obtenidos, pero no solo es importante el aumento de la producción, sino también la estabilidad de los rendimientos lo que le mejora la predictibilidad del negocio agropecuario.

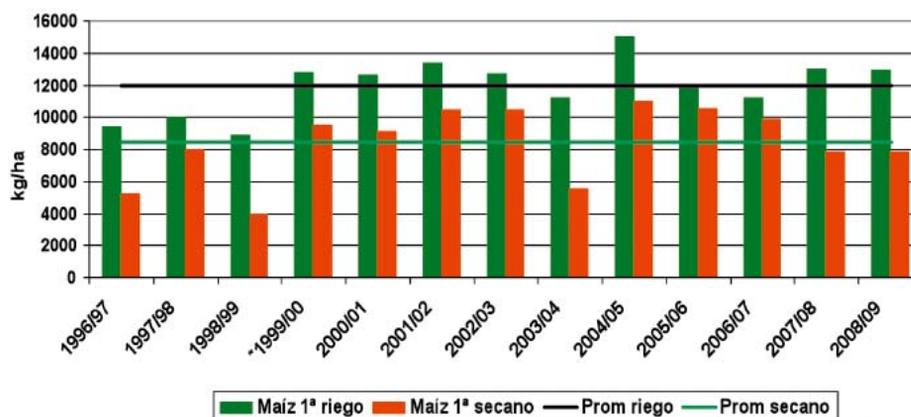
En el caso particular del trigo que se desarrolla durante la estación seca, las diferencias se hacen más notables como se observa en la Figura 9.

En los cultivos de verano, se destaca no solo el aumento de los rendimientos sino también la estabilidad de los mismos. Los valores obtenidos para maíz se presentan en la Figura 10 y para soja en la Figura 11.

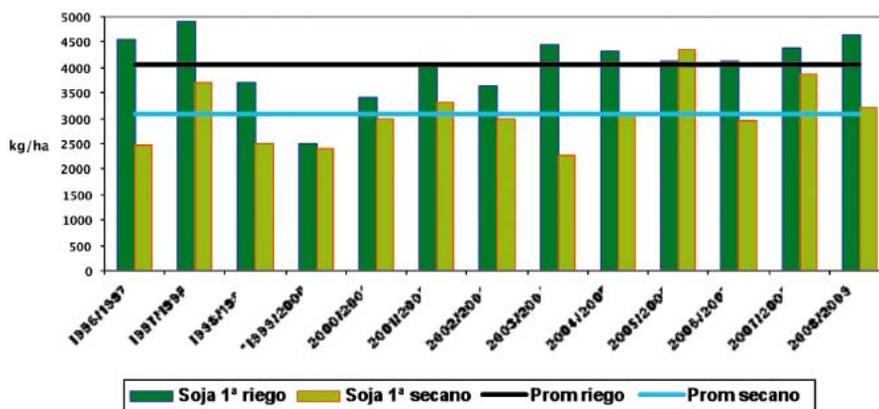
**Figura 9:** Manfredi. Rendimientos promedio anuales de trigo en riego y seco.



**Figura 10:** Manfredi. Rendimientos promedio anuales de maíz en riego y seco.



**Figura 11:** Manfredi. Rendimientos promedio anuales de soja en riego y seco.



(\*) Representa merma de rendimiento por bicho bolita (1999-2000).

**Cuadro 4:** Rendimientos promedio de Manfredi en riego y seco (período 1996-2009).

CULTIVO	RENDIMIENTO PROMEDIO (Kg/ha)		Diferencia (Kg/ha)	Incremento en % respecto seco	RIEGO promedio (mm)
	RIEGO	SECANO			
TRIGO (ant. soja)	5090	2443	2647	108	206
TRIGO (ant. Maíz)	4580	2110	2470	117	206
SOJA 1ª	4018	3074	944	31	126
SOJA 2ª	2973	2513	460	18	98
MAIZ 1ª	12600	9390	3210	34	152
MAIZ 2ª	9713	7310	2403	32	124

**Cuadro 5:** Resultados económicos, en base a rendimiento y riego promedio de los distintos cultivos.

CULTIVO	RENDIMIENTO (Kg/ha)		RIEGO (mm)	MB (US\$/ha)		Diferencia (US\$/ha)
	RIEGO	SECANO		Riego	Secano	
TRIGO (ant soja)	5090	2443	206	202,6	64	138,6
TRIGO (ant. Maíz)	4580	2110	206	115,1	24	91,1
SOJA 1 <sup>a</sup>	4018	3074	126	506,0	397,5	108,5
SOJA 2 <sup>a</sup>	2973	2513	98	327,7	297,9	29,8
MAIZ 1 <sup>a</sup>	12600	9390	152	649,3	513,5	135,8
MAIZ 2 <sup>a</sup>	9713	7310	124	399,5	315	84,5

A modo de resumen, en el Cuadro 4 se presentan los valores promedios de rendimientos y milímetros (mm) de riego aplicados (1996-2009) para los cultivos que integran la rotación, y la diferencia en rendimientos entre riego y secano en cada cultivo. Es necesario aclarar que los cultivos están presentes en todas las campañas.

### Resultados económicos

Para las dos rotaciones, secuencia A y B, se calcularon los márgenes brutos (Cuadro 5), tomando como rendimiento los valores promedios obtenidos en el período (1996-2009). Para establecer el precio de grano se tomó como referencia junto con los valores de los insumos correspondientes a la revista Agromercado de mayo de 2010. La cantidad y tipo de insumo aplicados, difieren para riego y secano, y están acordes a las necesidades de cada sistema. El costo del mm de riego, es el establecido para el módulo de INTA Manfredi, calculado en 0,56 U\$/mm.

## 4.4. Consideraciones finales

El riego suplementario es una excelente tecnología que permite aumentar y estabilizar la pro-

ducción, existe otra ventaja que es la posibilidad de incorporar producciones alternativas que amplían el espectro de negocios, mejorando la diversidad de cultivos y/o pasturas disminuyendo el efecto detrimental de los monocultivos. Aunque la utilización del recurso agua debe ser realizada con mucha responsabilidad, esto implica extremar los cuidados que requiere el monitoreo continuo de los acuíferos para mantener constante la calidad química del agua, como también es importante el monitoreo de los suelos regados para detectar cambios en las condiciones físicas o químicas de los mismos.

Finalmente siendo el agua un recurso estratégico, deberíamos pensar que su uso debe incluir a la mayor cantidad de productores, sobre todo pequeños y medianos; y para mejorar aún más la eficiencia del uso del agua, tenemos que considerar además de la producción primaria, el agregado de valor como producción de alimentos especializados o bioproductos.

Agradecimiento: especialmente al ingeniero Eduardo Martellotto, por su colaboración en la redacción de este trabajo, y el aporte de ideas en su diagramación.



# 5. Riego mecanizado: ensayos de uniformidad y eficiencia de los diferentes tipos de emisores

J.N. Ortíz; J.A. de Juan y J.M. Tarjuelo

**José Nicolás Ortíz. Decanato de Agronomía:** Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado". Barquisimeto- Venezuela. Contacto: [jortiz@ucla.edu.ve](mailto:jortiz@ucla.edu.ve)

**José Arturo de Juan Valero:** Investigador, Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), Universidad de Castilla-La Mancha. Contacto: [Arturo.Juan@uclm.es](mailto:Arturo.Juan@uclm.es)

**José María Tarjuelo:** Investigador, Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), Universidad de Castilla-La Mancha. Contacto: [jose.tarjuelo@uclm.es](mailto:jose.tarjuelo@uclm.es)

## 5.1. Resumen

El objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto del tipo de emisor y su altura sobre las pérdidas por evaporación y arrastre (PEA), la uniformidad de aplicación de agua con el riego (CU), la uniformidad del agua en el suelo (CUS) y la uniformidad de producción del cultivo utilizando un equipo pivot con dos tipos de emisores (uno de plato giratorio [EPG] y otro de plato fijo [EPF]) y dos alturas (1 y 2.5 m) sobre el suelo. El experimento se desarrolló durante tres campañas de riego en una parcela de 18 ha ubicada en Albacete, España. Los resultados muestran que las PEA fueron significativamente superiores en los emisores de plato fijo colocados a 2,5 m de altura (EPF 2,5) respecto a los emisores de plato giratorio ubicados a 1 m de altura (EPG 1), con cifras de 8,0 y 13,7% para los riegos nocturnos y diurnos respectivamente. Los menores valores de PEA se registraron en el EPG 1, con cifras de 3,3 y 8,2%, para los riegos nocturnos y diurnos, respectivamente. Los EPG consiguen mayor uniformidad de aplicación de agua (CU de 90-95%) que los EPF (CU de 80-85%), siendo poco afectados por el viento. El valor de uniformidad correspondiente al conjunto de riegos acumulados (CUA) con equipos pivote recoge mejor el efecto sobre la producción final del cultivo que los valores correspondientes a riegos individuales. Este efecto es mucho más importante en los EPF, por la forma que tienen de aplicar el agua.

Conseguir una uniformidad de aplicación con riego por aspersión en torno  $CU \approx 80\%$  en riegos individuales, puede ser suficiente para alcanzar una buena uniformidad de producción, ya que los correspondientes CUS del agua en el suelo puede superar fácilmente el 90%. Valores de  $CU > 90\%$  en riegos individuales no incrementan de forma significativa la uniformidad del agua en el suelo. La producción final de la remolacha azucarera ha estado más condicionada por la cantidad de agua disponible en el suelo para el cultivo, que por las escasas diferencias de uniformidad de agua en el suelo que se consiguen con el riego con equipos pivote, siendo los resultados representativos de lo que ocurre en un riego real con este tipo de máquinas.

**Palabras clave:** Uniformidad de aplicación de agua, uniformidad de agua en el suelo, sistema pivote, emisor de plato giratorio, emisor de plato fijo, remolacha azucarera, diámetro de gota.

**Keywords:** Water application uniformity, soil water uniformity, centre pivot, rotating spray plate sprinklers, fixed spray plate sprinklers, sugar beet, drop diameters

## 5.2. Introducción

El uso eficiente del agua y la energía en la agricultura es cada vez más importante dada la tendencia generalizada a disminuir el agua disponible para la agricultura y el incremento del

coste de la energía, lo que condiciona la viabilidad de la agricultura de regadío en muchas zonas del mundo. Para hacer frente a esta realidad, desde finales del siglo XX se viene desarrollando la tecnología de aspersores para máquinas de riego (pivotes y laterales de avance frontal) que trabajan a baja presión para responder al incremento del coste de la energía (Kincaid et al., 1996; King and Kincaid, 1998). La uniformidad de aplicación del agua con el sistema de riego condiciona el consumo de agua y energía, así como la producción del cultivo y el posible impacto ambiental del regadío (Louis y Selker, 2000; McLean et al., 2001).

Los aspersores más modernos que se utilizan en los equipos pivote en las últimas décadas tratan de conseguir una gran proporción de tamaños de gota medio (entre 1,5 y 4 mm de diámetro) y un buen alcance (de 8 a 12 m, o más), trabajando a baja presión (menos de 200 kPa) (Tarjuelo, 1999). Estos tienen además la gran ventaja de permitir variar la altura de instalación respecto al suelo, lo que puede ayudar a reducir las pérdidas por evaporación y arrastre, manteniendo una buena uniformidad de aplicación del agua (Solomon et al., 1996).

Las pérdidas por evaporación en el aire dependen principalmente de (Tarjuelo et al. 2000): la humedad ambiental, la temperatura del aire y del agua, la altura del emisor, el tamaño de la gota y la velocidad del viento, mientras que las pérdidas por arrastre dependen de: la velocidad del viento, del tamaño de las gotas y la distancia que ésta tenga que recorrer hasta llegar al suelo. Lorenzini (2002) estudió el efecto de la temperatura del aire sobre la evaporación en el riego por aspersión, encontrando valores comprendido entre 4,2 y 7,7% cuando la temperatura del aire varió desde 21 a 27 °C. El conocimiento de los factores que afectan a las PEA es importante para desarrollar estrategias de conservación del agua (Tarjuelo et al., 2000).

Kincaid et al. (1986), en un estudio sobre las PEA y uniformidad, en sistemas pivote de baja presión, obtuvieron unas pérdidas de agua por evaporación y arrastre de 12% para la altura de 4m, mientras que, para las alturas de 1 y 2m, generalmente, fueron menores al 5%. Abo-Ghobar (1992) estudió dichas pérdidas, a nivel de campo en clima desértico, en tres sistemas de riego pivote de baja presión, encontrando que las pérdidas promedio fueron de 15.6%, 21.2%,

y 35.8% para las alturas de los emisores respecto al suelo de 1.25 m, 1.75 m y 2.5 m, respectivamente. Playan et al. (2005) encontraron que las PEA en un sistema de avance frontal equipado con emisores de baja presión fueron de 9.8% y 5% durante el día y la noche, respectivamente. Además, concluyen que la velocidad del viento fue la variable más explicativa para predecir las pérdidas nocturnas y diurnas, tanto en sistemas de cobertura total como en lateral de avance frontal, a excepción del riego nocturno en el lateral.

En riego con equipos pivote, la uniformidad de aplicación del agua depende principalmente de la carta de emisores, del tipo de emisor y su espaciado en la máquina, de la altura sobre el suelo o sobre la cubierta vegetal, de la topografía de la parcela, y de la velocidad de movimiento de la máquina para no producir escorrentía (King y Kincaid, 1998). Un incremento en la altura del emisor produce normalmente una mayor uniformidad de riego, pero aumentan las pérdidas por evaporación y arrastre (Faci et al., 2001; Montero et al. 2003). La situación del emisor a menor altura reduce la anchura mojada y aumenta la pluviometría, lo cual puede causar problemas de escorrentía en suelos con baja tasa de infiltración (Faci et al., 2001).

El modelo radial de distribución de agua en los EPG tiene forma trapezoidal, resultando una aplicación de agua más constante en el tiempo, lo cual es positivo para prevenir la escorrentía, debido a la estabilidad de la intensidad de aplicación (Sourell et al., 2003). Los EPF por el contrario, concentran la aplicación de agua en una o dos coronas circulares, lo que aumenta la probabilidad de que se pueda producir escorrentía (Faci et al., 2001).

La velocidad y dirección del viento son los principales factores que distorsionan el patrón de distribución del agua en el riego por aspersión, jugando un papel importante respecto a las pérdidas por evaporación y arrastre (Tarjuelo et al., 1999; Dechmi et al. 2004). La influencia de la velocidad del viento sobre la uniformidad del riego esta relacionada con el tipo de aspersor, diámetro de la boquilla, presión de trabajo y altura de la boquilla respecto a la superficie del suelo (Tarjuelo et al., 1999).

La variación en la velocidad y dirección del viento en los distintos eventos de riego condu-

ce a un coeficiente de uniformidad acumulado más alto que el coeficiente de uniformidad promedio de los eventos de riego individuales (Dechmi, 2002; Martínez, 2004).

El tamaño de gotas es un aspecto importante a tener en cuenta en el diseño de sistemas de riego por aspersión (McLean et al., 2001), por su vinculación con la distorsión del patrón de distribución por efecto del viento, las PEA durante el riego, y la posible reducción de la velocidad de infiltración del suelo si se forma costra en el mismo por la rotura de la estructura con el impacto de la gota (Salomon et al., 1996). Los mejores emisores son los que tienen mayor proporción de gotas de tamaño medio (con diámetros entre 1,5 y 4 mm), evitando las gotas de gran tamaño por ser mayor la energía de impacto sobre el suelo y el cultivo (Kincaid et al., 1996).

La uniformidad del rendimiento de los cultivos, cuando el agua es el único factor limitante, depende de la uniformidad del agua disponible en su zona radicular. Esta, está condicionada por: el efecto de los riegos acumulados, la interceptación del agua por parte de la cubierta vegetal y su posterior distribución, la dinámica del agua en el suelo, y el desarrollo del sistema radicular del cultivo (Stern y Bresler, 1983; Li y Kawano, 1996; Chen et al., 2004). Para el cálculo de la lámina bruta a aplicar a partir de las necesidades de agua requeridas por el cultivo debe utilizarse la uniformidad del agua en el suelo, y no la uniformidad de aplicación de agua por el sistema de riego, incluyendo además el valor correspon-

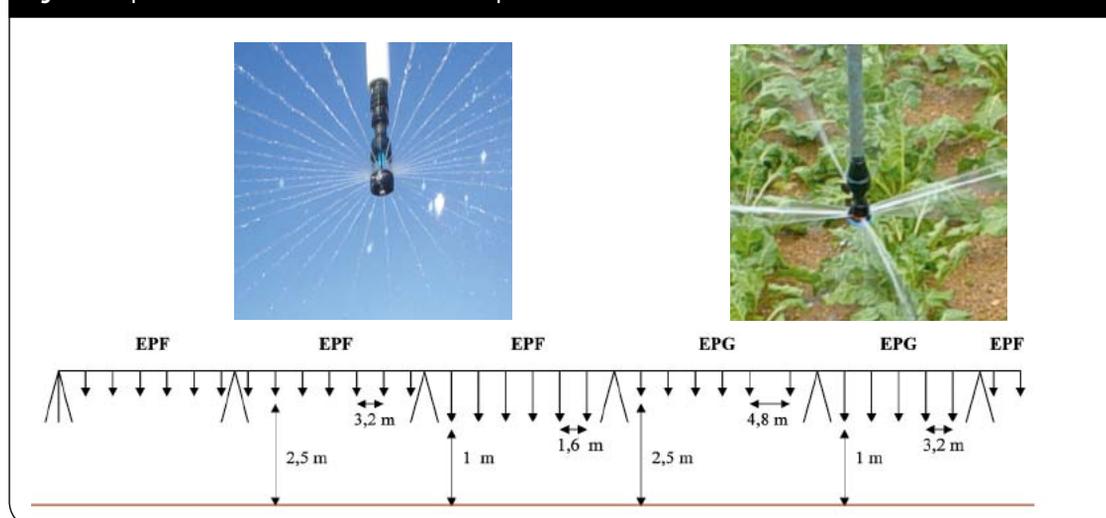
diente al conjunto de riegos, al menos cuando los intervalos entre riegos es inferior a tres o cuatro días (Ortega et al.; 2004a y b).

El objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto del tipo de emisor y su altura sobre los pérdidas por evaporación y arrastre (PEA), la uniformidad de aplicación de agua con el riego (CU), la uniformidad del agua en el suelo (CUS) y la uniformidad de producción del cultivo utilizando un equipo pivot con dos tipos de emisores, uno de plato giratorio (EPG) y otro de plato fijo (EPF) y dos alturas (1 y 2.5 m) sobre el suelo.

### 5.3. Materiales y métodos

El experimento se desarrolló durante los años 2004, 2005 y 2006 en una parcela de 18 ha regada con un equipo pivote, situada en Albacete, España. En el pivote, se sustituyeron los aspersores tradicionales de impacto por los más recientes emisores de baja presión a diferentes alturas respecto a la superficie del suelo, utilizando para ello bajantes flexibles de tubería de polietileno de 25 mm de diámetro. Se instalaron dos tipos de emisores: a) el EPG (Rotator®) en los tres años de experimentación, y b) un EPF tipo LEN®, en el primer año de ensayo, y tipo D3000®, en los dos siguientes años. En el primer tramo, y en el alero, se colocaron emisores de plato fijo (Figura 1). En los tramos T II y T III se colocaron EPF, situados a 2,5 m sobre el suelo en el T II y a 1 m en el T III. En los tramos T IV y T V se colocaron EPG, situado a 2,5 m del suelo en el T IV

Figura 1: Esquema de la colocación de emisores en la máquina.



y a 1m en el T v. En el primer año de ensayo, la separación entre emisores fue de: 3,2m en todos los tramos excepto en T III que se colocaron a 1,6m. En los siguientes dos años la separación fue la misma, a excepción del T IV, que se cambió a 4,8m, para adaptarse a la práctica habitual con este tipo de emisor. En todos los casos los emisores tenían reguladores de presión, con salida a 140kPa, siendo la presión a la entrada de la máquina de 210 kPa, con una tubería de diámetro 168,3mm (6 5/8") y 242m de longitud.

El ensayo se planteó para su realización con un equipo pivot funcionando en condiciones reales de campo. Este diseño experimental tiene dos problemas: 1) La máquina requiere aumentar el tamaño de boquillas al aumentar la distancia al centro pivote, y el diámetro de boquilla ha sido identificado como uno de los factores que condicionan la distribución de tamaños de gota, con posible influencia sobre las PEA y la uniformidad de riego; 2) No es posible realizar repeticiones en la misma máquina. Como consecuencias de estas limitaciones los resultados pueden ser eventualmente diferentes si las distintas combinaciones emisor-altura fueran localizadas en tramos diferentes. Es muy complicado resolver estos problemas sin comprometer otras virtudes experimentales como es el poder ensayar el efecto integrado del incremento de tamaño de boquillas en una máquina real. Actualmente se están llevando a cabo nuevos ensayos, cambiando la localización de las combinaciones emisor-altura en diferentes tramos, para tratar de explicar mejor ese efecto.

Las principales características de los aspersores utilizados en la máquina se muestran en la Tabla 1.

El ensayo se realizó con un cultivo de remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L.), ocupando la cuarta

parte del área regada por el centro pivote. Por exigencias del cultivo, fue necesario cambiarlo de lugar en los diferentes años, con lo que también cambió ligeramente el tipo de suelo en cada ensayo. El agua total aplicada (riego más precipitación efectiva [PE]) durante las tres campañas de riego se muestra en la Tabla 2. La PE se estimó a partir de la variación de humedad en los primeros 50 cm del perfil del suelo, considerados como profundidad radicular efectiva del cultivo según muestreos realizados en campo. Se realizaron un total de 38, 79 y 47 riegos durante la primera, segunda y tercera campaña de riegos respectivamente, con dosis medias de riego de 8 a 25mm. El mayor número de riegos en la segunda campaña fue debido a que el suelo tenía menor capacidad de retención, siendo necesarios riegos más ligeros y frecuentes.

En los tres años de experimentación, se realizaron 60 evaluaciones de riego (16 durante el día y 44 durante la noche) siguiendo la metodología propuesta por Merriam y Keller (1978), Merriam et al. (1980) y Heermann (1990), y las Normas Internacionales ANSI/ASABE S436.1 (ASABE, 2001) e ISO-11545 (ISO, 2001). Para esto, se utilizaron pluviómetros de 16 cm de diámetro y 15cm de altura, espaciados 2m siguiendo la dirección de un radio, colocados a 50cm sobre el suelo, manteniéndolos siempre por encima del cultivo.

En cada evaluación, se midió el caudal a la entrada al pivote, así como al inicio y final de cada tramo, utilizando para ello un caudalímetro de ultrasonidos portátil Panametrics, modelo PT 868 (Panametrics Ltd. USA), con una precisión del 2%, previamente calibrado. Estas mediciones permitieron obtener el caudal descargado por cada tramo para luego calcular las PEA como diferencia entre la altura media descar-

**Tabla 1.** Principales características de la carta de aspersores del pivot.

	Distancia del centro pivote (m)	Diámetro de boquilla(mm)	Espaciamiento entre aspersores (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Alcance medio (m)
Tramo I EPF 2.5	0 to 50	1.8 – 3.2	3.2	0.2 to 0.5	5 m
Tramo II EPF 2.5	50 to 100	3.4 – 4.6	3.2	0.6 to 1.3	5.5 m
Tramo III EPF 1	100 to 150	3,2 – 4.2	1.6	0.6 to 0.8	4.5 m
Tramo IV EPG 2.5	150 to 200	7.3 – 8.1	4.8	2.5 to 3.2	9 m
Tramo V EPG 1	200 to 238	6.6 – 7.5	3.2	2.1 to 2.7	8 m

EPF: Emisor de plato fijo; EPG: Emisor de plato giratorio.

**Tabla 2.** Dosis media (mm) recibida por el cultivo (riego + pe) en los diferentes tramos y campañas de riego.

Año	Tramo	Agua recibida por el cultivo (mm)		
		Riego	Pe	Total
Primero	EPF 2.5	654.30	134	788.30
	EPF 1	662.07		796.07
	EPG 2.5	721.90		855.90
	EPG 1	735.47		869.47
Segundo	EPF 2.5	733.28	40	773.28
	EPF 1	745.86		785.86
	EPG 2.5	689.37		729.37
	EPG 1	765.60		805.60
Tercero	EPF 2.5	794.57	95	889.57
	EPF 1	834.03		929.03
	EPG 2.5	753.94		848.94
	EPG 1	806.25		901.25

EPF: Emisor de plato fijo; EPG: Emisor de plato giratorio; PE: precipitación efectiva

gada por los emisores pertenecientes a dicho tramo (AMD) y la altura media recogida por los pluviómetros en cada tramo (AMR). Durante el primer año de ensayo se evaluaron 18 riegos (3 durante el día y 15 durante la noche), durante el segundo año se evaluaron otros 18 riego (4 durante el día y 14 durante la noche) y durante el tercer año se evaluaron 24 riegos (9 durante el día y 15 durante la noche). Los riegos diurnos se realizaron entre las 14 y 16 h, tratando de tener las condiciones de mayor temperatura y evapotranspiración, así como mayor velocidad del viento. Para los riegos nocturnos se programó el equipo pivot para que alcanzara la línea de pluviómetros al amanecer.

Para evitar el efecto borde entre tratamientos solo se consideraron los 30m centrales de cada tratamiento, dejando 10m de borde a cada lado en los tramos de la máquina de 50m. En el último tramo, de solo 38m de longitud, fue necesario colocar dos placas con malla de rafia de 3 m de largo por 1,5m de alto, sujetas a la estructura de la máquina, para tratar de evitar el efecto borde entre tratamientos en esa zona.

Los parámetros meteorológicos se midieron en una estación meteorológica automatizada situada a 150m de la parcela de ensayos. Para cada parámetro se tomaron los valores medios registrados durante el tiempo en que la máquina pasó sobre la línea de pluviómetros.

En cada evaluación, se calculó el coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein (CU) y la uni-

formidad de distribución (DU) para cada combinación emisor-altura ensayada (Eq. 1 y 2)

En cada una de las campañas de estudio, también, se calculó el coeficiente de uniformidad

### Ecuación 1

$$CU = \left[ 1 - \frac{\left| \frac{\sum_{s=1}^n S_s}{\sum_{s=1}^n D_s} - \frac{\sum_{s=1}^n D_s S_s}{\sum_{s=1}^n S_s} \right|}{\sum_{s=1}^n D_s S_s} \right] * 100$$

donde: D<sub>s</sub> es la lámina de agua (mm) recogida por un pluviómetro a una distancia S (m) desde el centro pivote; s es un subíndice que denota la posición a una distancia S; n es el número de pluviómetros.

### Ecuación 2

$$DU = \frac{AMR_{25}}{AMR} * 100$$

donde: AMR<sub>25</sub> es la altura media de agua recogida (mm) por el 25% de los pluviómetros que menos agua recogen dentro de cada tramo, ponderada según la distancia al centro pivote; AMR es la altura media de agua recogida (mm) dentro de cada tramo, ponderada según la distancia al centro pivote.

acumulado (CUA) y la uniformidad de distribución acumulada (DUA), considerando la suma de los volúmenes de riego recogidos en cada uno de los pluviómetros en los sucesivos eventos de riegos evaluados.

Los valores de las PEA se relacionaron con datos climáticos, para analizar sus posibles efectos sobre dichas pérdidas, y buscar algún modelo de predicción de las mismas, aunque no hay que olvidar que en las PEA así estimadas se están incluyendo también los posibles errores de medida del caudal y del agua recogida en los pluviómetros, que pueden estimarse en no más del 3%. La información climática considerada fueron la velocidad del viento, la temperatura del aire y la humedad relativa, medidas en una estación climática automatizada situada a 150m de la parcela regada por el pivote.

Para estudiar la distribución del tamaño de gota de los emisores utilizados en los tres años de experimentación, se seleccionaron dos boquillas por tipo de emisor que representaran la gama de diámetros de la carta de emisores (Tabla 1), eligiéndose las boquillas N° 17 (3,37mm) y 23 (4,56mm) en los EPF, y las N° 25 (4,96mm) y 40 (7,98mm) en los EPG. Las mediciones se realizaron en condiciones sin viento y a una presión de 140 kPa. Para el LEN, solo se midieron las gotas caídas a 4,2 m desde el emisor al ser ésta la única distancia de impacto, mientras que en el D3000, se midió a 3,0 y 6,0 m de distancia al tener dos zonas de impacto ya que el emisor descarga agua con dos ángulos de salida.

Para medir el tamaño de gotas se utilizó un Disdrómetro Óptico ODM 470. (Eigenbrodt, Germany). El equipo está basado en la atenuación de un haz de rayos infrarrojos conforme las gotas pasan a través de una ventana óptica (Montero et al., 2006; Burguete et al., 2007). El haz detector tiene forma circular de 20mm de diámetro. Cada gota produce una atenuación de señal, la cual puede ser relacionada con el diámetro de gota y el tiempo de paso. Para caracterizar la distribución de tamaños de gota se calcularon el diámetro medio (DM), el diámetro numérico medio (DNM) y el diámetro volumétrico medio (DVM), (Montero, 1999; Montero et al., 2003b). El DVM, que es uno de los parámetros más importantes, se define como el diámetro que divide el volumen de la descarga en

dos partes iguales, de manera que la mitad del volumen se corresponde con gotas menores al DVM y la otra mitad con gotas de tamaño superior. El DNM se corresponde con la media de los diámetros, sin referencia al volumen. Como el DNM y el DVM están afectados por la proporción de gotas pequeñas y grandes, respectivamente, la relación entre ambos (RD) es un indicador de la distribución de gotas, obteniendo mayor uniformidad de tamaños de gotas cuanto más próximo a uno esté el valor de RD.

El suelo era un Xeric torriorthent (Soil Taxonomy) con textura franca (4% de elementos gruesos, 28% arena fina, 44% limo y 24% arcilla) de acuerdo con USDA (1979). La capacidad de retención de agua en el suelo estimada en los primeros 50cm fue de 0,08m m-1

Para cuantificar la uniformidad del agua en el suelo, durante la segunda y tercera campañas se instalaron 16 tubos de acceso de PVC en los 30m centrales de cada combinación emisor-altura, localizados junto a los pluviómetros utilizados para medir el agua aplicada con la máquina, utilizando un sensor basado en la tecnología de Reflectometría en el Dominio de Frecuencias (FDR): Diviner 2000TM (Sentek Pty Ltd., Stepney, Australia). El equipo fue calibrado en laboratorio siguiendo la metodología descrita por Sentek, 2000 y Martínez, 2004. Las medidas en cada punto se realizaron a intervalos de 10cm, llegando hasta los 60cm de profundidad. Las medidas antes del riego se realizaron a las 8:00 PM para el riego nocturno, y una hora antes de que la máquina pasara por la línea de pluviómetros cuando el riego era diurno. En la segunda campaña de ensayo fue necesario hacer las medidas 15 horas después de cada riego al tener que regar casi diariamente por tratarse de un suelo arenoso franco (79% de arena, en los primeros 60cm), con abundantes elementos gruesos (46,3 %). En la tercera campaña de ensayo, las mediciones se realizaron 24-30 horas después del riego, ya que el suelo era franco arenoso (con 49,6% de arena y 43,1% de elementos gruesos).

Los parámetros de uniformidad del agua en el suelo para cada una de las combinaciones emisor-altura se calcularon con las ecuaciones (3) y (4).

La clasificación climática de Papadakis (1966), sitúa el área de estudio en un clima

### Ecuación 3

$$CU_s = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |\theta_i - \theta_m|}{\theta_m \cdot n} \right) * 100$$

donde: CUs, es el coeficiente de uniformidad de la humedad en el suelo a una determinada profundidad (%);  $\theta_i$ , es el contenido volumétrico de agua en suelo a esa profundidad ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) correspondiente al tubo  $i$ ;  $\theta_m$  es la humedad media del suelo en esa profundidad ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) correspondiente a los  $n=16$  tubos de acceso de una misma combinación emisor-altura.

### Ecuación 4

$$UD_s = \frac{\theta_{25}}{\theta_m} * 100$$

donde: DUs, es la uniformidad de distribución de la humedad en el suelo (%); y  $\theta_{25}$ , es la media del 25% de valores de humedad más bajo a una profundidad determinada de los 16 puntos muestreados en cada combinación emisor-altura.

Mediterráneo Cálido. La programación de riegos se realizó utilizando el método del balance de agua simplificado en la zona radicular del cultivo, siguiendo la metodología FAO (Pereira and Allen, 1999). La remolacha se sembró directamente tratando de alcanzar 120.000 plantas ha-1. El resto de operaciones de cultivos fueron las normalmente utilizadas por los agricultores en la zona (de Juan et al., 2003).

Para conocer el rendimiento del cultivo y el contenido de azúcar se seleccionaron cuatro parcelas por combinación emisor-altura de 10m<sup>2</sup> cada una (4 hileras de 5m de longitud).

El análisis estadístico de los resultados se realizó usando el software Statgraphics Plus™ (v. 5.1 para Windows, Statistical Graphics Corp., Herndon, VA, USA). Para determinar las diferencias significativas entre medias de los grupos en el ANOVA, se utilizó el test de Menores Diferencias Significativas (LSD) de Fisher.

## 5.4. Resultados y discusión

### Análisis de las pérdidas por evaporación y arrastre

En la Tabla 3 se presentan el valor medio, máximo y mínimo de las PEA, la velocidad del viento, la temperatura y la humedad relativa. Los datos fueron obtenidos en las evaluaciones realizadas durante la noche y el día, en los tres años de ensayo.

Los mayores valores de PEA se obtuvieron con el EPF 2.5, seguido del EPG 2.5 y de los emisores localizados a 1 m, con menor valor para el EPG. Para el mismo tipo de emisor se observa un incremento de las PEA al aumentar la altura, lo que tiene sentido ya que las gotas recorren mayor camino en contacto con el aire. Se obtuvieron menores PEA en los riegos nocturnos, con diferencias significativas entre las distintas combinaciones emisor-altura. En los riegos diurnos solo se encontraron diferencias significativas entre los EPG 1 y los emisores situados a 2,5m sobre el suelo.

**Tabla 3.** Valores medio y extremos de las PEA y de otros datos climáticos en los ensayos realizados durante el día y la noche, en los tres años de ensayo.

	Value	PEA (%)				W (m/s)	T (°C)	HR (%)
		EPF 2.5	EPF 1	EPG 2.5	EPG 1			
Dia	Mínimo	7.0	4.5	6.2	3.8	1.4	14.8	13.6
	Máximo	26.1	16.2	28.5	18.9	6.2	32.3	85.6
	Medio	13.6(a)	9.2(bc)	12.5(ab)	8.2(c)	3.5	27.4	34.1
Noche	Mínimo	3.0	1.2	2.1	1.0	0.1	7.6	27.9
	Máximo	16.3	13.0	13.1	8.3	3.7	26.7	93.6
	Medio	8.0(a)	4.7(c)	6.3(b)	3.3(d)	1.3	17.4	66.6

W = velocidad del viento; T = temperatura; HR = Humedad relativa.

En la Tabla 4, se presentan los porcentajes de reducción de las PEA durante los riegos nocturnos respecto a las PEA obtenidas en los riegos diurnos, para todas las combinaciones emisor-altura. La mayor reducción de PEA entre riego diurno y nocturno se produce en el EPG 1, llegando a una reducción del 75% respecto a las PEA obtenidas con el EPF 2,5.

Playan et al. (2005), estudiaron las PEA nocturnas y diurnas en una pequeña maquina experimental equipada de EPG colocados a 2 m de altura, la cual permaneció estática sobre un suelo desnudo durante las evaluaciones, encontrando una reducción de pérdidas de noche respecto al día del 62%, cifra que es intermedia a las encontradas en este trabajo para los EPG 1 y EPG 2,5; lo cual es lógico si se considera que la altura de ubicación de los emisores, también, es casi intermedia a las empleadas en este experimento.

Para relacionar las PEA con el tamaño de gotas, en la Tabla 5, se presenta el diámetro de gotas para los EPG y EPF, medido en condición sin viento. En la misma, puede observarse que en ambos tipos de emisores se generan tamaños de gotas crecientes con la distancia y con el diámetro de boquilla. La distribución de gotas es más uniforme con los EPF que con los EPG ya que los valores de RD, están más próximos a uno. Puesto que el EPF produce una mayor proporción de gotas pequeñas (menor de 1,5mm), esto puede ayudar a explicar las mayores PEA que se obtienen con este emisor respecto al EPG, ya que estas gotas pequeñas son más sensibles a la evaporación y arrastre por el viento (Edling, 1985). No se han encontrado diferencias signi-

ficativas en las PEA entre los emisores LEN® y D3000®, aunque, como se muestra en la Tabla 5, hay pequeñas diferencias en la distribución de tamaños de gota.

No se encontró ninguna correlación entre la dirección del viento y la uniformidad de aplicación del agua o las PEA cuando la dirección del viento fue constante. No obstante, el efecto es difícil de cuantificar con precisión debido a la aleatoriedad de los cambios de dirección durante el ensayo.

Para determinar los modelos de predicción de las PEA se aplicó la metodología Stepwise de regresión múltiple, tomando como posibles variables climáticas explicativas la velocidad del viento, la humedad relativa y la temperatura. Los riegos se agruparon de acuerdo a: 1) su momento de aplicación (nocturnos y diurnos); 2) tipo de emisor utilizado; y 3) altura sobre el suelo. Los modelos que mejor explican las PEA se muestran en la Tabla 6. En el caso de riegos nocturnos, solo la velocidad del viento fue seleccionada como variable explicativa. El término independiente y el coeficiente de regresión fueron estadísticamente significativos ( $p < 0.001$ ) en los cuatro modelos. Aunque los coeficientes de determinación de los cuatro modelos no son muy altos ( $R^2$  entre 23 y 25%), la relación entre las variables del modelo es estadísticamente significativa ( $p < 0.001$ ). En el caso de riegos diurnos, también fue la velocidad del viento la única variable explicativa seleccionada, y los coeficientes de regresión fueron estadísticamente significativos. En este caso, el término independiente ni fue estadísticamente significativo. Además, aunque los coeficientes de determinación resultaron mayores ( $R^2$  entre 25 y 50%), la relación entre las variables del modelo tiene un menor nivel de significación ( $p < 0.05$  y  $p < 0.001$ , dependiendo del modelo).

Los modelos obtenidos considerando todos los riegos proporcionaron una mejor predicción de las PEA que considerando los riegos diurnos y nocturnos separadamente (Tabla 6). El nivel de explicación de las PEA con la velocidad del viento fue ahora mayor ( $R^2$  entre 48 y 58%), siendo la relación entre las variables del modelo estadísticamente significativa ( $p < 0.001$ ). Puesto que se realizaron más evaluaciones durante la noche que durante el día, las ecuaciones pueden estar sesgadas hacia la situación de riegos nocturnos.

**Tabla 4.** Reducción de las pérdidas por evaporación y arrastre (pea, %) alcanzadas en los riegos nocturnos respecto a los riegos diurnos.

		Riego nocturno			
		EPF 2,5	EPF 1,0	EPG 2,5	EPG 1,0
Riego diurno	EPF 2,5	41,4	65,6	53,7	75,6
	EPF 1,0	12,7	48,7	31,0	63,7
	EPG 2,5	35,8	62,3	49,3	73,3
	EPG 1,0	2,0	42,5	22,6	59,3

pea = pérdidas por evaporación y arrastre; epf 2,5 = emisor de plato fijo a 2,5 m de altura; epf 1,0 = emisor de plato fijo a 1 m de altura; epg 2,5 = emisor de plato giratorio a 2,5 m de altura; epg 1,0 = emisor de plato giratorio a 1 m de altura.

**Tabla 5.** Diámetro de gotas producidas por los emisores de plato giratorio (EPG) y fijo (EPF).

Db (mm)	EPG					
	4.96			7.98		
De (m)	2,4	5,4	7,8	2,4	5,4	8,4
Dm (mm)	0,85	1,52	2,01	1,01	1,36	1,17
DNM (mm)	0,74	1,51	1,16	0,88	1,05	0,75
DVM (mm)	0,84	1,93	4,28	1,03	2,34	4,31
Rd	0,88	0,79	0,27	0,85	0,45	0,17
Db (mm)	EPF					
	D3000			LEN		
De (m)	3,0	5,4	3,0	6,0	4,2	4,2
Dm (mm)	1,02	1,63	1,50	1,95	2,02	1,99
DNM (mm)	0,93	1,63	1,41	2,01	1,89	1,90
DVM (mm)	1,00	1,81	1,53	2,24	2,09	2,19
Rd	0,93	0,93	0,92	0,90	0,90	0,88

db= diámetro de boquilla; de= distancia desde el emisor; dm= diámetro medio de gota; dnm= diámetro numérico medio; dvm= diámetro volumétrico medio; rd= cociente entre dnm y dvm.

En los emisores colocados a 1m, el modelo explicativo de las PEA incorporó también las variables temperatura y humedad relativa para los EPF y EPG. Sin embargo, su aporte al R2 era solo de unas 3 unidades, por lo que se prefirió tomar el modelo solo con la velocidad de viento y, así, conservar la misma estructura en todas las situaciones estudiadas.

Aparte de los ajustes anteriores, también, se realizó un ajuste de las PEA sin discriminar el tipo de emisor, considerando únicamente la altura

de instalación, resultando, en todos los casos, el viento como única variable explicativa de los modelos (Tabla 7). Estos modelos, en general, no mejoran en relación con los modelos antes expuestos (Tabla 6), sin embargo su uso reduce el número de ecuaciones necesarias.

Como comentario a los modelos de predicción de las PEA, se puede decir que la velocidad del viento fue la variable más explicativa de dichas pérdidas; sin embargo, queda una variabilidad importante sin explicar, lo que evidencia que

**Tabla 6.** Modelos predictivos de las PEA para riegos diurnos, nocturnos y ambos conjuntamente.

Riegos	Tratamiento	PEA	R2 (%)	SE
Nocturnos	EPF 2.5	5.46*** + 1.90***W	23	2.78
	EPF 1	2.88*** + 1.36***W	24	1.99
	EPG 2.5	4.27*** + 1.54***W	25	2.15
	EPG 1	2.09*** + 0.92***W	26	1.28
Diurnos	EPF 2.5	4.48ns + 2.63*W	30	4.57
	EPF 1	2.83ns + 1.82*W	26	3.52
	EPG 2.5	-0.26ns + 3.66**W	50	4.19
	EPG 1	-0.38ns + 2.46**W	41	3.37
Nocturnos y diurnos	EPF 2.5	4.90*** + 2.40***W	48	3.31
	EPF 1	2.38*** + 1.83***W	50	2.45
	EPG 2.5	2.94*** + 2.62***W	58	2.94
	EPG 1	0.95* + 1.91***W	58	2.15

PEA = pérdidas por evaporación y arrastre; R2 = coeficiente de determinación; SE = error estándar de la estimación; EPF 2,5 = emisor de plato fijo a 2,5m de altura; EPF 1 = emisor de plato fijo a 1m de altura; EPG 2,5 = emisor de plato giratorio a 2,5m de altura; EPG 1 = emisor de plato giratorio a 1m de altura; W = velocidad del viento (m s-1); \* = p<0,05; \*\* = p<0,01; \*\*\* = p<0,001; ns = no significativo.

**Tabla 7.** Modelos predictivos de las pérdidas por evaporación y arrastre (peA) para riegos nocturnos, diurnos y ambos nocturnos y diurnos, para dos alturas del emisor.

Riegos	Altura de emisor	PEA	R2 (%)	SE
Nocturnos	1 m	2.48*** + 1.14***W	20	1.81
	2.5 m	4.86*** + 1.72***W	22	2.61
Diurnos	1 m	1.23ns + 2.14*W	32	3.39
	2.5 m	2.11ns + 3.15*W	39	4.32
Nocturnos y diurnos	1 m	1.67*** + 1.87***W	52	2.38
	2.5 m	3.92*** + 2.51***W	52	3.21

PEA = pérdidas por evaporación y arrastre; R2 = coeficiente de determinación; SE = error estándar de la estimación; W = velocidad del viento (m s<sup>-1</sup>); \* = p < 0,05; \*\* = p < 0,01; \*\*\* = p < 0,001; ns = no significativo.

existen otros factores que también influyen sobre el proceso de evaporación y arrastre, como podrían ser los cambios de la dirección y velocidad del viento durante el ensayo, la propia imprecisión del método de medida, o la distribución de tamaños de gota producida por cada tipo de emisor.

En un riego en particular, se pudo observar que la dirección del viento se invirtió justo en el momento en que el equipo pivote pasaba por la línea de pluviómetros, causando grandes diferencias entre lo descargado y lo recogido por los pluviómetros, con valores comprendidos entre 16 y 56% para los EPG 1 y EPF 2,5, respectivamente. Aunque estas fueron las mayores pérdidas registradas en los tres años de ensayo, las mismas no se correspondieron con la mayor velocidad del viento ocurrida en todas las evaluaciones. Al tratarse de una situación excepcional, este riego no se consideró en los cálculos de las PEA. Dechmi (2002) indica que rachas fuertes de viento en períodos cortos pueden inducir a pérdidas por evaporación y arrastre que no son explicadas por la velocidad promedio del viento.

En un experimento con un lateral de riego equipado con emisores *Rotator* colocados a 2m de altura, Playan et al. (2005), concluyen que la velocidad del viento fue la variable que mejor explica las PEA en los riegos diurnos y en ambas condiciones en conjunto (riegos diurnos y nocturnos), pero, al contrario que en este trabajo, no encontraron esta relación cuando solo se consideraban los riegos nocturnos. En el mismo estudio, estos autores obtuvieron valores de R2 para el emisor tipo *Rotator* situado a 2m sobre el suelo de 28, 38 y 60% en los riegos nocturnos, diurnos y en ambas condiciones (diurnos y noc-

turnos) respectivamente. Estas cifras son parecidas a las obtenidas en este trabajo para los EPG.

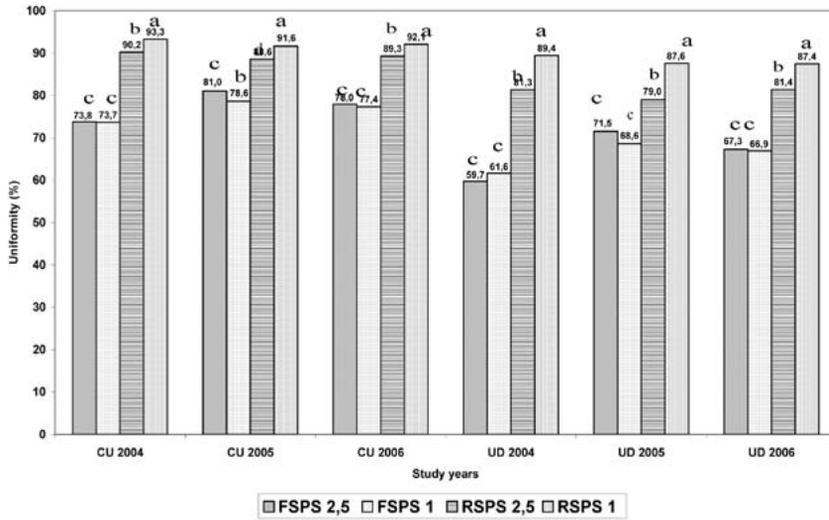
### Uniformidad del agua aplicada en los riegos individuales

En la Figura 2, se presentan los valores medios de CU y DU correspondientes a los 60 riegos individuales evaluados en las tres campañas de experimentación. En ella, se observa que los mayores valores se consiguen con los EPG, siendo significativamente mayores los valores correspondientes a los aspersores situados a 1m de altura sobre el suelo que a 2,5m. Este resultado contrasta con el hecho de que la mayor parte de los aspersores aumentan la uniformidad de distribución del agua al aumentar la altura (Tarjuelo 1999). También se obtuvieron diferencias significativas entre los EPF y los EPG, pero no entre los EPF a las dos alturas, excepto en el año 2005, donde se obtuvo una mayor uniformidad con el aspersor EPF 2,5 m. Puesto que, como después se verá, los bajos valores de CU y DU correspondientes a EPF no se corresponden con los altos valores de uniformidad del agua en el suelo y de la producción final del cultivo, parece razonable pensar que el tamaño de los pluviómetros utilizados (de 16cm de diámetro de recogida) puede resultar pequeño para muestrear el reparto de agua con los EPF.

Las diferencias entre los valores de CU y DU ponen de manifiesto que ambos parámetros ofrecen una información complementaria, siendo más sensible a la variabilidad la DU.

Para comparar los EPF (LEN® en la primera campaña y D3000® en las dos campañas siguientes) se realizó un análisis estadístico entre ellos, re-

**Figura 2:** Valores medios de cu y du de los riegos individuales para las cuatro combinaciones aspersor-altura ensayadas.



EPF = FSPS: Emisor de plato fijo; EPG = RSPS: Emisor de plato giratorio

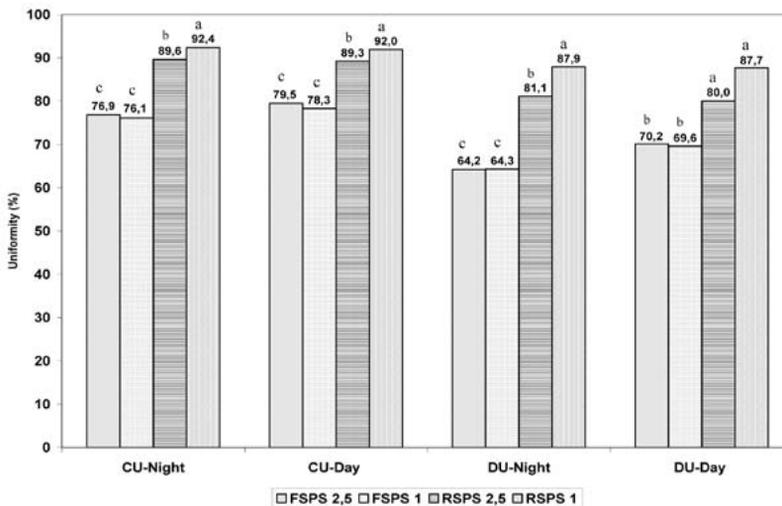
sultando significativamente mayores los valores de CU y DU obtenidos con el D3000® que con el LEN®, tanto para los aspersores situados a la altura de 1 m como a 2,5 m. Una posible explicación puede estar en que los D3000® emiten los pequeños chorros de agua con dos ángulos de salida, mientras que los aspersores LEN solo tienen un ángulo de salida, con una sola distancia de alcance, lo que puede disminuir la probabilidad de que el agua caiga dentro de los pluviómetros. No

obstante, como después se verá, estas diferencias no se mantienen en la uniformidad del agua en el suelo ni en la producción final del cultivo

No se encontraron diferencias significativas en los valores de CU y DU por efecto de las dos separaciones entre aspersores (3.2 y 4.8m) utilizados en las diferentes campañas de riego con el EPG 2.5.

En la Figura 3 se muestran los valores de CU y DU medios para los riegos diurnos y nocturnos

**Figura 3:** Valores medios de CU y DU en riego diurno y nocturno para las cuatro combinaciones aspersor-altura.



EPF = FSPS: Emisor de plato fijo; EPG = RSPS: Emisor de plato giratorio

nos, en las cuatro combinaciones emisor-altura ensayadas durante los tres años de estudio. La principal novedad de estos resultados respecto a los de la Figura 2 es el mejor comportamiento de los EPF en riegos diurnos que en nocturnos, siendo mayores las diferencias en los valores de DU, al tener este parámetro mayor nivel de discriminación. Puesto que la velocidad del viento fue mayor en los riegos diurnos (3,5m/s de media, frente a 1,3m/s en los nocturnos), se pone de manifiesto el efecto positivo del viento en este tipo de aspersores, al menos para las velocidades de viento muestreadas (0,2-4,9m s-1).

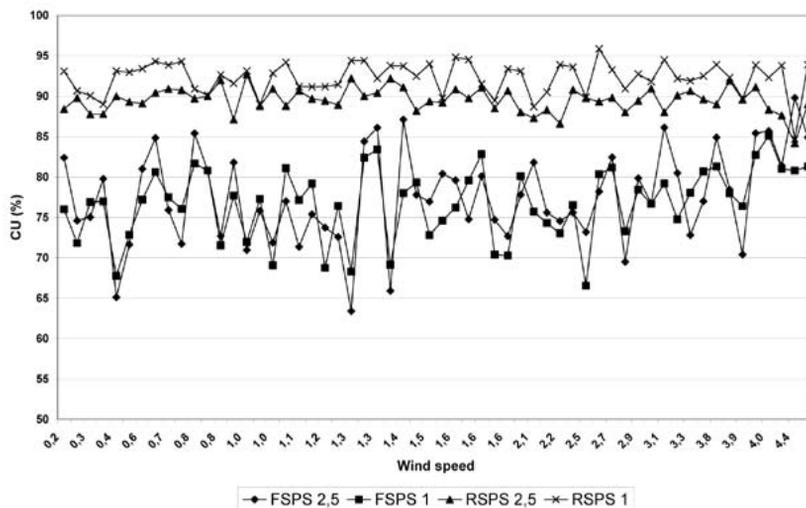
Cuando la dirección del viento es constante, no se encontró ninguna relación entre esta y CU o DU. No obstante, pequeños cambios en la dirección del viento durante la evaluación aumentan, en general, los valores de CU y DU, sobre todo en los EPF. No obstante, este efecto es difícil de cuantificar con precisión dada la aleatoriedad con que se suelen producir esos cambios de dirección durante los ensayos de evaluación. Aunque la dirección del viento puede tener un efecto significativo en el borde externo del área regada por el equipo pivote, sobre todo cuando sople en la misma dirección del lateral de la máquina, lo que puede incrementar o disminuir significativamente el área regada, este efecto no ha sido objeto de estudio en este trabajo.

Comparando los valores de CU de los riegos diurnos y nocturnos para el mismo tipo de emi-

sor, sólo se encontraron diferencias significativas entre el EPF 2,5 diurno respecto al EPF 1 nocturno, siendo superior en el primero. En los EPG solo hubo diferencias significativas entre valores de CU entre los EPG 1 y EPG 2,5, independientemente de que los riegos fueran diurnos y nocturno. Esto pone de manifiesto el efecto positivo del viento en la uniformidad de riego con los EPF, y el escaso efecto del viento sobre el EPG.

En la Figura 4 se muestra la relación entre CU y la velocidad del viento (W) para las distintas combinaciones emisor-altura durante los tres años ensayo. En ella se pone de manifiesto la gran diferencia de uniformidad de riego entre los dos tipos de aspersores. La gran variabilidad encontrada en los valores de CU con los EPF pone también de manifiesto otra de las novedades de este trabajo como es que el tamaño de los pluviómetros utilizados puede resultar pequeño para muestrear el reparto de agua con este tipo de aspersores. Esta gran variabilidad de valores de CU obtenidos con los EPF impide poner de manifiesto con claridad el crecimiento de este parámetro con la velocidad del viento, aunque se puede apreciar esa tendencia. El comportamiento de la UD fue similar al CU, aunque con valores más bajos para todas las combinaciones emisor-altura. Los mayores valores de CU se consiguen con los EPG, con valores entre 90-95% para la altura de 1m, y alrededor de 90% para la altura de 2,5m. Con los EPF los valores de CU no superan el 80-85%.

**Figura 4:** Relación entre CU y velocidad del viento en las cuatro combinaciones aspersor-altura.



epf = fsp: Emisor de plato fijo; epg = rsp: Emisor de plato giratorio

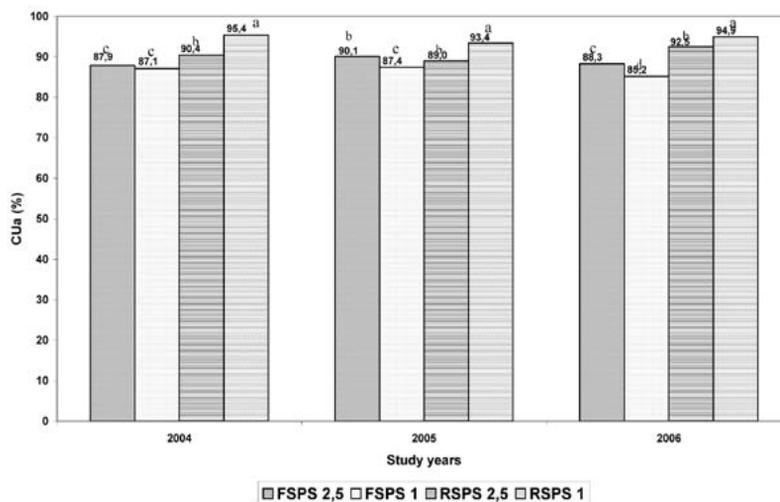
## Uniformidad del agua aplicada en los riegos acumulados

En las Figuras 5 y 6 se muestran los valores medios de CU y UD acumulados (CUa, y UDa) para los tres años de ensayo. Comparando estos resultados con los de la Figura 2 se aprecia una notable mejoría en relación con los riegos individuales (Figura 2), sobre todo en los EPF. Los resultados ponen de manifiesto los mayores valores de uniformidad del EPG 1, con diferencias significativas respecto a los demás.

También se pone de manifiesto un pequeño problema en la carta de aspersores en el tratamiento EPG 2,5 durante el segundo año de ensayo, que se solucionó en la siguiente campaña. Las Figuras 5 y 6 también ponen de manifiesto que los menores valores medios de CU y UD obtenidos con los EPF tipo LEN® respecto a los D3000® (Figura 2) desaparecen en los riegos acumulados.

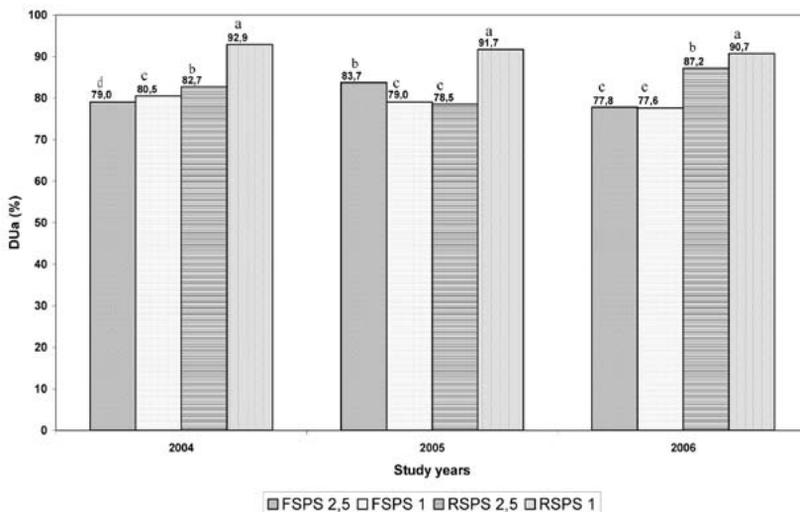
Para ilustrar el comportamiento de los riegos individuales y acumulados, en la Figura 7 se muestra, a modo de ejemplo, la evolución de

**Figura 5:** Valores de CUa medios correspondientes a los riegos acumulados para las cuatro combinaciones emisor-altura ensayadas.



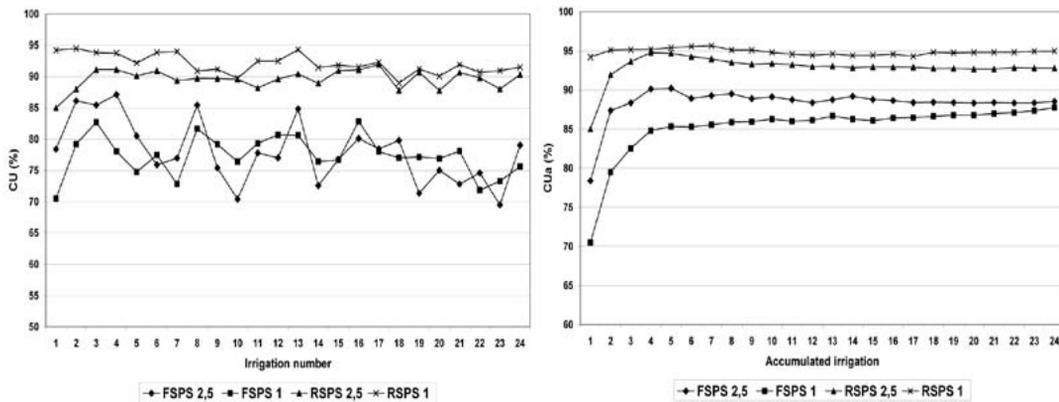
EPF = FSPS: Emisor de plato fijo; EPG = RSPS: Emisor de plato giratorio

**Figura 6:** Valores de DUa medios correspondientes a los riegos acumulados para las cuatro combinaciones aspersor-altura ensayadas.



EPF = FSPS: Emisor de plato fijo; EPG = RSPS: Emisor de plato giratorio

**Figura 7:** Evolución del CU en los riegos individuales (CU) y acumulados (CUA) durante el último año de ensayo en las cuatro combinaciones emisor-altura estudiadas.



EPF = FSPS: Emisor de plato fijo; EPG = RSPS: Emisor de plato giratorio

CU y CUA en las cuatro combinaciones emisor-altura estudiadas para el último año de estudio. En la misma se observa una notable mejoría al acumular los riegos, sobre todo en los EPF, donde desaparece la variabilidad obtenida en los valores de CU. El mismo efecto se encontró en el parámetro DU, solo que con menores valores en todos los tratamientos.

### Uniformidad del agua en el suelo

A título de ejemplo, en la Figura 8, se presenta, para las cuatro combinaciones emisor-altura estudiadas, una comparación de los valores de CU obtenidos en los riegos individuales durante el último año de ensayo y la evolución del CU correspondiente a la humedad en el suelo después del riego (CUSd), una vez que ha cesado la redistribución del agua en el suelo. Para mayor claridad, se han seleccionado los valores correspondientes a las profundidades de 0 a 35 cm (promedio de las lecturas de los sensores a 10, 20 y 30 cm), zona que coincide con la de mayor actividad radicular en este cultivo. Semejante nivel de uniformidad del agua en el suelo se encontró en la zona más profunda. Los valores de uniformidad antes del riego (CUSA) son muy parecidos, y normalmente algo inferiores.

En las dos zonas correspondientes a los EPF cabe destacar que los valores de CUSd (en la capa de 0-35 cm) siempre fueron superiores a los de CU, resultando casi constantes a lo largo del tiempo, a pesar de las fluctuaciones de CU en los diferen-

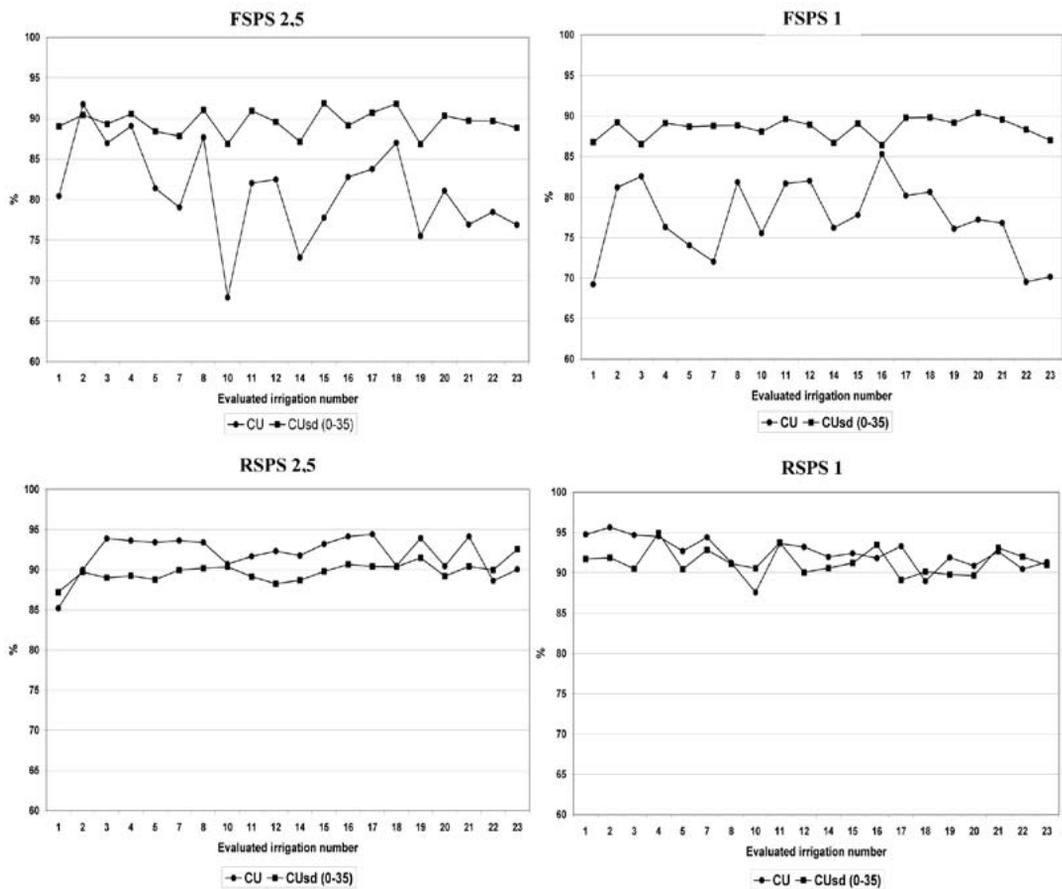
tes riegos. Este hecho, junto con los buenos resultados obtenidos en la producción del cultivo, como después se verá, pone de manifiesto que la estimación de la uniformidad del agua aplicada con el riego utilizando pluviómetros de 16 cm de diámetro en los EPF puede no ser muy precisa, dada la forma en que estos aspersores realizan la aplicación del agua. En los EPG, lo valores de CU y de CUSd en la capa 0-35 cm son muy parecidos, lo cual es lógico al tratarse de valores de CU muy altos.

La uniformidad de distribución antes (UDsa) y después (UDsd) del riego, muestra una tendencia semejante a la de CUS, aunque con valores más bajos.

Un resumen de los valores medios de CU y UD durante el segundo y tercer años de ensayo, así como de CUSd y UDsd en la capa de 0-35 cm, para las cuatro combinaciones emisor-altura estudiadas, con sus respectivos coeficientes de variación, se muestran en la Tabla 8. Es preciso recordar que los valores de uniformidad en superficie y en el perfil del suelo corresponden a los mismos puntos del terreno, destacando la menor variabilidad del agua en el suelo respecto al agua aplicada en superficie.

El comportamiento de la uniformidad del agua en el suelo en el intervalo de 0-35 cm resultó semejante en los dos años de ensayo. Cabe destacar que en la zona correspondiente al EPG 1 es donde se alcanzan los mayores valores de

**Figura 8:** Coeficiente de uniformidad de aplicación del agua (CU) y de la humedad en el suelo después del riego (CU<sub>sd</sub>) a la profundidad de 0-35cm para las cuatro combinaciones emisor-altura estudiadas durante el último año de ensayo.



EPF = FSPS: Emisor de plato fijo; EPG = RSPS: Emisor de plato giratorio

uniformidad en el suelo, existiendo diferencias significativas con el resto ( $p < 0,001$ ). Por el contrario, en la zona correspondiente al EPF 1 es donde el agua en el suelo tiene menor uniformidad, aunque, como se verá al analizar los datos de producción final del cultivo, esta menor uniformidad del agua en el suelo no ha tenido repercusión en la producción del cultivo.

Son muchos los trabajos publicados que relacionan la uniformidad de aplicación del agua en sistemas de riego por aspersión estacionario con la uniformidad del agua en el suelo (Stern y Bresler (1983), Li and Kawano (1996), Li (1998), Li y Rao (2000), Dechmi (2002), Martínez (2004), de Juan et al. 2008), sin embargo, no se han encontrado referencias que utilicen equipos pivote como en este trabajo. En la gran mayoría de los trabajos antes citados se indica un aumento de la unifor-

midad del agua en el suelo respecto a la uniformidad del agua aplicada con el sistema de riego, confirmando lo obtenido en este trabajo.

La gran diferencia entre los valores de uniformidad del agua aplicada con los EPF respecto a la uniformidad del agua en el suelo, ratifica la hipótesis de que una buena parte de la variabilidad del agua aplicada con el riego puede ser causada por insuficiente tamaño de los pluviómetros que indican las normas de ensayo ANSI/ASABE S436.1 (ASABE, 2001) e ISO-11545 (ISO, 2001), actualmente en revisión cuando se tiene que realizar la evaluación de este tipo de aspersores. Pruebas realizadas en trabajos posteriores con pluviómetros de mayor tamaño (o utilizando grupos de tres pluviómetros como estos colocados uno al lado del otro), ratifican esta hipótesis (resultados aún no publicados).

**Tabla 8:** Valores medio (M, %) y coeficiente de variación (CV, %) de la uniformidad de aplicación del agua (CUy UD) y del contenido de agua en el suelo después del riego en el estrato 0-35 cm (CUsd y UDsd).

Tipo y altura del emisor	Segundo año de ensayo							
	CU		CUsd		DU		DUsd	
	M (%)	CV (%)	M (%)	CV (%)	M (%)	CV (%)	M (%)	CV (%)
EPF 2,5	81,0	5,0	90,3b	1,0	71,5	7,9	85,6b	1,7
EPF 1	78,6	6,4	88,1c	1,1	68,6	9,7	81,2c	2,5
EPG 2,5	88,6	1,5	90,4b	1,3	79,0		86,0b	1,9
EPG 1	91,6	4,4	92,1a	0,7	87,6	5,6	87,6a	1,3

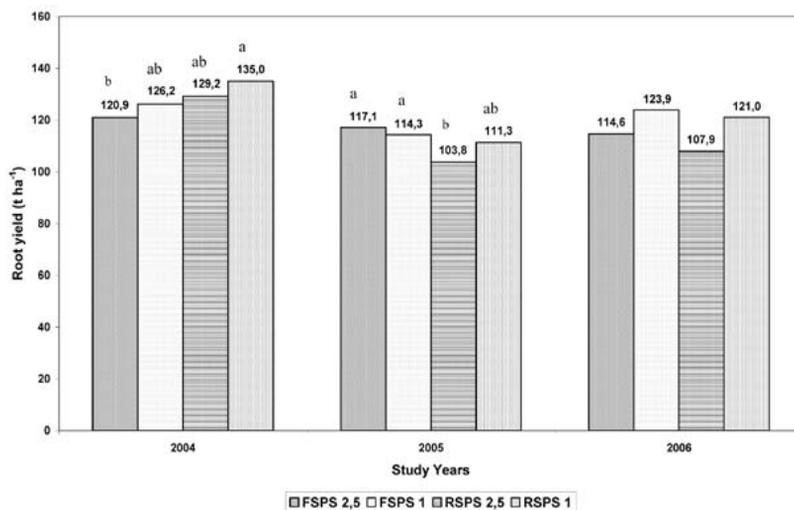
Tipo y altura del emisor	Tercer año de ensayo							
	CU		CUsd		DU		DUsd	
	M (%)	CV (%)	M (%)	CV (%)	M (%)	CV (%)	M (%)	CV (%)
EPF 2,5	78,0	7,1	89,5b	1,7	67,3	10,5	84,4a	2,8
EPF 1	77,4	6,0	88,5c	1,4	66,9	10,0	80,2b	2,5
EPG 2,5	89,3	2,6	89,8b	1,3	81,4	3,0	85,1a	2,3
EPG 1	92,1	2,2	91,4a	1,7	87,4	4,0	85,9a	3,9

### Uniformidad en la producción final del cultivo

Los resultados obtenidos (Figura 9) ponen de manifiesto que la producción final del cultivo depende más del agua total aplicada (Tabla 2) que de la uniformidad con que se ha aplicado con las distintas combinaciones emisor-altura ensayadas (Tabla 8), dado el alto nivel de uniformidad del agua en el suelo que se consigue en todos los casos. Estas diferencias de agua

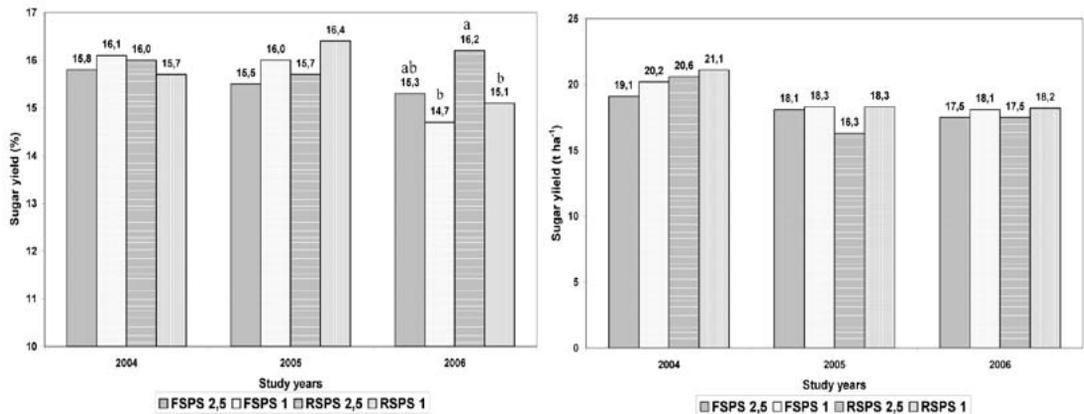
aplicada a los distintos tratamientos fueron inevitables al tratarse de un ensayo realizado con un equipo pivot en condiciones reales de campo, no habiendo podido ajustar mejor la carta de aspersores de la máquina. Los resultados de producción obtenidos en 2005 han estado además condicionados por la peor calidad del suelo en la zona correspondiente a los tratamientos con EPG 2,5 y EPG 1.

**Figura 9:** Rendimiento de raíz para las diferentes combinaciones emisor-altura.



EPF = FSPS: Emisor de plato fijo; EPG = RSPS: Emisor de plato giratorio

**Figura 10:** Producción de azúcar para las diferentes combinaciones emisor-altura. En riqueza en azúcar (%) a la izquierda y en producción total (t ha<sup>-1</sup>) a la derecha



EPF = FSPS: Emisor de plato fijo; EPG = RSPS: Emisor de plato giratorio

Los resultados obtenidos parecen muy interesantes desde un punto de vista económico ya que ponen de manifiesto que puede ser suficiente regar con los EPF, que son más baratos que los EPG, y de mayor durabilidad al no tener ningún elemento giratorio, aunque apliquen el agua con menos uniformidad. Este trabajo, y otros realizados con sistemas de aspersión estacionarios en cultivos de maíz (Martínez 2004 y de Juan et al. 2008) y cebolla (Jiménez 2008 y Jiménez et al. 2009, en publicación), ponen de manifiesto que conseguir un CU  $\approx$  80% en riegos individuales, puede ser suficiente para alcanzar una buena uniformidad de producción, ya que el correspondiente CUS puede superar fácilmente el 90%.

La producción de azúcar (Figura 10) sigue la misma tendencia que la producción de raíz, aunque no hubo diferencias significativas entre las distintas combinaciones emisor-altura en ninguno de los tres años de estudios. En cuanto a la riqueza en azúcar, se aprecia una mayor proporción de azúcar en los tratamientos en que se aplicó menos agua de riego, aunque solo hubo diferencias significativa ( $p < 0,05$ ) en el año 2006 entre el tratamiento que menos agua recibió (EPG 2.5) y el resto (Figura 9). La falta de diferencias significativas en el primer y segundo año de ensayo puede estar en parte relacionada con la lluvia de 18 mm caída dos semanas antes de la recolección, a pesar de que se dejó de regar tres semanas antes de la recolección. Por el contrario, en el último año de ensayo no hubo

lluvia después de dejar de regar, diez días antes de la recolección.

## 5.5. Conclusiones

Los emisores de plato giratorio (EPG, Rotator®) utilizados en riego con equipos pivote consiguen mayor uniformidad de aplicación de agua (CU de 90-95%) que los emisores de plato fijo (EPF, LEN® or D3000®) (CU de 80-85%), siendo además poco afectados por el viento.

La uniformidad de los riegos acumulados aumenta de forma significativa respecto a los riegos individuales en los EPF, pero no en los EPG, siendo ésta del mismo orden de magnitud que la uniformidad del agua en el suelo.

Un tamaño de los pluviómetros de 16cm de diámetro parece insuficiente para evaluar el riego con equipos pivote utilizando EPF dada la gran variabilidad de los valores de CU y UD obtenidos, estando además muy distantes de los valores de CUA y DUA de los riegos acumulados y de la uniformidad del agua en el suelo o la uniformidad en la producción del cultivo.

Llama la atención que con los EPG localizados a 1m de altura se hayan obtenido mayores valores de CU y DU que cuando se sitúan a 2,5m, al contrario de lo que suele ocurrir con los demás tipos de aspersores.

El valor de uniformidad correspondiente al conjunto de riegos acumulados con equipos pivote recoge mejor el efecto sobre la producción final del cultivo que los valores correspondientes a riegos individuales. Este efecto es mucho más importante en los EPF, dada la forma que tienen de aplicar el agua.

La producción final del cultivo ha estado más condicionada por la cantidad de agua disponible en el suelo, que por las escasas diferencias de uniformidad de agua en el suelo que se consigue con el riego mediante equipos pivote, siendo los resultados representativos de lo que ocurre en un riego real con este tipo de máquinas.

Una uniformidad de aplicación de agua en riegos individuales con equipos pivote en torno a  $CU \approx 80\%$  puede ser suficiente para

alcanzar una buena uniformidad de producción ya que el correspondiente  $CU$ s del agua en el suelo puede superar fácilmente el 90%. Valores de  $CU > 90\%$  en riego individuales no incrementan de forma significativa la uniformidad del agua en el suelo ni la producción final del cultivo.

**Agradecimientos:** Los autores quieren expresar su gratitud al Ministerio de Educación y Ciencia (MEC) de España por financiar el proyecto AGL2007-66716-CO3-03. También quieren agradecer a la empresa Aisco Equipment Europe, Ltd. y al Centro de Formación Agroambiental de Albacete, por la ayuda prestada, proporcionando los medios e instalaciones necesarias para poder realizar este trabajo.

# 6. ¿Por qué no regar por gravedad?

M. García Petillo

Mario García Petillo: Departamento de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía. Montevideo, Uruguay.  
Contacto: [mgarciap@fagro.edu.uy](mailto:mgarciap@fagro.edu.uy)

## 6.1. Introducción

Cuando se planifica la introducción del riego en un sistema de producción, la elección del método a utilizar es una decisión crucial, que puede significar por sí misma el éxito o el fracaso futuro del emprendimiento.

En el Uruguay, este tipo de decisiones se suele tomar sin tener toda la información objetiva necesaria para poder optar por la mejor alternativa.

No existe el mejor método de riego, sino que existe un método de riego que es el más apropiado para una situación particular dada.

El análisis de cada situación debe tomar en consideración aspectos relativos a: i) el suelo, fundamentalmente textura y profundidad, ii) la topografía, grado de la pendiente y microtopografía del terreno, iii) la fuente de agua, caudal o volumen, disponibilidad, calidad y precio, iv) el cultivo, sensibilidad al déficit hídrico, valor de la producción, manejo (en hileras o denso, siembra directa, etc.), v) la mano de obra, disponibilidad, costo, capacitación, vi) la energía, costo y vii) el productor, disponibilidad financiera, idiosincrasia, capacidad de gestión.

Pereira y Trout (1999) presentan un cuadro que resume una serie de factores que favorecen la elección entre los diferentes métodos de riego. Estos autores sostienen que el riego por superficie es el más adecuado cuando se dan los siguientes factores: bajo precio del agua, abundante disponibilidad de agua sin importar mayormente su calidad, baja a media velocidad de infiltración del suelo, alta capacidad de almacenamiento de agua del suelo, topografía plana y

uniforme, cultivos de bajo valor y poco sensibles al déficit hídrico, bajo valor de la mano de obra, alto valor de la energía, baja disponibilidad de capital y limitada exigencia en tecnología.

Las políticas públicas del Uruguay, así como los trabajos actuales de los diferentes investigadores buscan que el riego se desarrolle fundamentalmente en sistemas agrícolas, agrícola-ganaderos y agrícola-lecheros. Es decir, que el riego se destinará a cultivos poco sensibles y de bajo valor. También parece claro que en cada sistema de producción se destinarán los mejores suelos para los cultivos regados, y que cualquier política de desarrollo del riego debe incluir necesariamente un plan de construcción de fuentes de agua.

O sea que, con la única excepción de que nuestras topografías no son planas y uniformes, se estarían dando todos los factores que Pereira y Trout (1999) consideran que favorecen la adopción del riego por superficie.

Sin embargo, y a pesar de lo anterior, es muy frecuente que los productores y sus técnicos asesores descarten *a priori* la elección de este método.

Los argumentos más frecuentemente utilizados para tomar dicha decisión son que el riego por superficie es poco uniforme, que es muy ineficiente y por lo tanto es mucha el agua que se desperdicia, que es muy difícil de instrumentar y que por ello la condición necesaria es tener mano de obra con un muy importante entrenamiento previo.

En este trabajo se intentará discutir y poner en perspectiva esas afirmaciones.

## 6.2. Análisis y discusión de los problemas

### El riego por superficie hace una aplicación poco uniforme del agua

Los dos indicadores de uniformidad del riego más utilizados son la Uniformidad de Distribución (DU) y el Coeficiente de Uniformidad (CU)

La uniformidad de distribución (%) se calcula como:

#### Ecuación 1

$$DU = 100 (Z_{25} / Z_{media})$$

Donde:  $Z_{25}$  es la lámina media infiltrada (mm) en la cuarta parte del área que recibe menos agua y  $Z_{media}$  es la lámina media infiltrada en toda la parcela.

El coeficiente de uniformidad (%) se calcula como:

#### Ecuación 2

$$CU = 100 \left( \frac{1 - \sum_{i=1}^n |Z_i - Z_{media}|}{n * Z_{media}} \right)$$

Donde  $Z_i$  es la lámina infiltrada en cada punto (mm),  $Z_{media}$  es la lámina media infiltrada en toda la parcela (mm) y  $n$  es el número de puntos de medida.

En los riegos a presión no se acostumbra a medir láminas infiltradas, sino que en aspersión son sustituidas por las pluviometrías medidas y en riego localizado por los caudales erogados por los goteros.

En el que quizás sea el estudio más ambicioso en cuanto a evaluación a campo de sistemas de riego (Hanson et al., 1995) realizado en California, encontraron los resultados que se presentan parcialmente en el Cuadro 1.

En sus conclusiones los autores señalan que “en contra de la creencia común” la uniformidad de distribución de los riegos localizados fue simi-

**Cuadro 1.** Tipo de equipo, número de equipos evaluados (Nº), uniformidad de distribución promedio (DU, %) y desvío estándar (Dest, %).

Tipo	Nº	DU (%)	Dest (%)
Aspersión portátil	164	62	15
Aspersión de movimiento continuo	57	75	10
Riego localizado	458	73	15
Surcos	157	81	14
Melgas	72	84	14

lar a la de los otros métodos. Más sorprendente aún es comprobar que los dos métodos de riego por superficie evaluados (surcos y melgas) son los que tienen mayor DU.

En Uruguay aún no disponemos de suficientes determinaciones de DU en diferentes sistemas de riego, como para estar en condiciones de hacer una comparación similar con datos nacionales.

### El riego por superficie desperdicia mucha agua

La eficiencia de aplicación (EA) es un concepto que fue y es ampliamente utilizado y que puede definirse como la relación entre la lámina de agua que queda almacenada en el suelo y que está disponible para el cultivo y la lámina total aplicada en el riego.

La tendencia más moderna (Pereira et al., 2010) tiende a definir la eficiencia para el cuarto menos regado de la parcela, según la relación:

#### Ecuación 3

$$ea = 100 \left( \frac{Z_r, lq}{D} \right)$$

Donde  $ea$  es la eficiencia de aplicación (%),  $Z_r, lq$  es la cantidad media añadida a la reserva de agua del suelo en la zona radicular (mm) en el cuarto menor de la parcela y  $D$  es la dosis bruta (mm) aplicada.

Estos mismos autores, operando con las ecuaciones (1) y (3) llegan a la relación:

#### Ecuación 4

$$ea \leq DU$$

Lo que indica que la uniformidad de distribución (DU) es el valor límite al que puede tender la eficiencia de aplicación (EA).

Pereira (1999) concluye que la uniformidad de distribución (DU) funciona como el indicador que caracteriza al sistema, mientras que la eficiencia de aplicación (EA) caracteriza la gestión del mismo en dependencia de las limitaciones impuestas por el sistema.

Todos los métodos de riego implican cierta pérdida de agua, que no queda disponible para las plantas en la zona radicular. Estas pérdidas son por percolación profunda por debajo de la zona radicular, por escurrimiento al pie de la parcela, por evaporación antes de llegar al suelo, o desde la superficie del suelo o de la cubierta vegetal, y por deriva, por efecto del viento fuera de la parcela.

Se suele asumir que en los riegos por superficie las pérdidas más importantes se dan por percolación profunda y escurrimiento al pie, en los riegos por aspersión las mayores pérdidas son por evaporación directa y deriva por el viento, y que en los riegos por goteo – en caso que no sea necesario aplicar una lámina para la lixiviación de sales – las pérdidas son insignificantes.

A continuación examinaremos rápidamente las pérdidas de agua en los diferentes métodos de riego.

#### En riego por superficie

A nadie se le ocurriría generalizar que “el rendimiento de los automóviles es de tantos kilómetros por litro de combustible”, ya que es sabido que el mismo depende de muchísimos factores como cilindrada del motor, marca y modelo del coche, estado de conservación, velocidad, carga, estado de los caminos, fluidez del tránsito, habilidad del conductor, etc.

De la misma forma, no se puede hablar de la eficiencia de aplicación de determinado método de

riego, y mucho menos si nos referimos a los riegos por superficie, que son los más dependientes de su operación.

A modo de ejemplo Durán y García (datos no publicados) hicieron un ensayo en Bella Unión, en una parcela de caña de azúcar regada por surcos.

El método tradicional de riego de la misma consistía en abrir la acequia con la azada frente a cada surco, aducir un caudal muy reducido (que demoraban más de 24 horas en recorrer toda su longitud) y manejar simultáneamente un número muy grande de surcos (200). Con esta operación la eficiencia de aplicación (EA) medida fue del 16%.

Se regó luego otra parcela similar, pero aduciendo el agua a los surcos mediante una tubería con salidas regulables frente a cada uno, utilizando dos caudales: primero se mojaba el surco con el máximo caudal que no generara erosión, y cuando éste llegaba al final del surco se reducía a un caudal apenas superior al infiltrado. Con esta operación la eficiencia de aplicación aumentó al 78%.

En resumen, no se puede decir que la eficiencia de aplicación de un método de riego es baja si el mismo no fue diseñado u operado correctamente.

#### En riego por aspersión

Como ya fue dicho, en los riegos por aspersión se asume que las mayores pérdidas se dan por evaporación directa y por deriva por el viento.

También se asume que no deberían existir pérdidas por escurrimiento. Esto es efectivamente cierto en los equipos de aspersión estacionarios, los cuales son diseñados con el criterio que la intensidad de precipitación no debe superar la velocidad de infiltración del suelo al final del riego.

Sin embargo, en los equipos de aspersión de movimiento continuo el equipo no aplica una intensidad de precipitación media durante todo el tiempo de riego, sino que aplica una altísima intensidad durante un corto período de tiempo.

La pluviometría máxima descargada por un pivote central será mayor cuanto mayor sea la longitud de la tubería, cuando mayor sea la velocidad de giro, y cuanto menor sea el diámetro mojado por los emisores. En los pivotes modernos, cuya longitud generalmente no es inferior a los 400m, que utilizan como emisores toberas pulverizadoras que mojan diámetros de 6 a 12m,

la precipitación instantánea en el extremo suele ser mayor a los 150mm hora-1.

Por supuesto que en estos casos siempre se supera la velocidad de infiltración del suelo, por lo que la existencia o no de escurrimiento estará relacionada fundamentalmente con la capacidad de almacenar agua en la superficie del mismo.

Esta capacidad dependerá fundamentalmente de la pendiente general de la parcela a regar, de la microtopografía o rugosidad de la superficie y de la textura del suelo.

Para estimar la dosis máxima de riego para diferentes situaciones, se presenta a continuación el Cuadro 2, adaptado de Tarjuelo (2005).

Como se desprende del Cuadro anterior, en las condiciones predominantes del Uruguay, con pendientes mayores al 3% y suelos francos a arcillosos, la dosis máxima de riego posible de ser aplicada sin que se produzca escurrimiento es muy limitada. Esto se agrava aún más si consideramos que con la técnica de la siembra directa, ampliamente difundida, la rugosidad del suelo es mucho menor.

Estas son las razones principales por las que en el Uruguay se observa muy frecuentemente escurrimiento en los tramos finales del pivote.

Otro factor a tener en cuenta es que con este método de riego se recomiendan mayores necesidades netas del cultivo para tener en cuenta la alta frecuencia del riego, las mayores pérdidas por evaporación y arrastre y el mayor consumo del cultivo por la fácil disponibilidad del agua. Keller y Bliesner (1990) proponen aumentar la ETC estacional en 2, 9 o 20% para cereales de grano, forrajes y pastos, respectivamente.

### En riego por goteo

En Uruguay es casi inexistente el uso del riego por goteo para cultivos extensivos y forrajes.

Sin embargo, en Europa y algunos países de América Latina se están llevando adelante políticas de ‘modernización’ de los regadíos, que buscan incentivar la sustitución de los riegos por gravedad por riegos por goteo.

Sin abundar demasiado, sí se puede afirmar que en las condiciones del Uruguay el volumen total de agua utilizado por el riego localizado en alta frecuencia en una temporada es significativamente mayor que el utilizado por un método ‘tradicional’ (aspersión o gravedad) que recargan el suelo, debido al mejor aprovechamiento de las lluvias que hacen estos últimos (García Petillo, 2010).

También se ha detectado en diferentes suelos del Uruguay, que sistemáticamente se producen pérdidas de agua por percolación profunda, muy superiores a las citadas en la bibliografía (Hayashi et al., 2010).

### El riego por superficie es muy difícil de instrumentar y requiere mano de obra muy calificada

Así como se discutió en los puntos I. y II. que esas afirmaciones eran en realidad pre conceptos en contra del riego por gravedad y que tenían poca validación en la práctica, este punto III sí que contiene las principales limitantes reales para aplicar este método.

En el Uruguay, por la abundancia y la distribución de sus precipitaciones, nunca fue necesario el riego como práctica imprescindible para producir. Por lo tanto, nunca existió una cultura ancestral del riego, que como en todas las culturas ancestrales manejara el riego por gravedad. Las únicas excepciones fueron los cultivos del arroz y la caña de azúcar, y justamente ambos se desarrollaron bajo riegos por gravedad (inundación en el arroz, surcos en la caña).

Posteriormente, y debido a la necesidad de aumentar y estabilizar la producción, y sobre todo, la calidad de los productos, se desarrolló el riego

**Cuadro 2.** Valores orientativos de dosis máximas de riego según el tipo de suelo y el grado de pendiente.

Suelo	Pendiente en %	Pendiente en %			
		> 5	3 – 5	1 – 3	0 – 1
Arcilloso	< 3	< 3	3 – 8	13 – 18	20 – 25
Franco	< 3	< 3	8 – 13	18 – 20	23 – 33
Arenoso	10 – 18	10 – 18	20 – 28	36 – 43	48 – 56

en las producciones más intensivas (horticultura, fruticultura, citricultura). Debido al alto valor de la producción de estos sistemas, se desarrollaron directamente con los riegos a presión (aspersión y goteo) sin pasar por la etapa histórica previa del riego por gravedad.

Por todo lo anterior, dentro de la cultura del agricultor, del ganadero, del tambero, no existe el riego, y por lo tanto tenderá a desechar toda práctica que visualice como 'complicada' y elija la que le resulte 'fácil'.

El país se enfrenta al desafío de desarrollar el riego en los cultivos de verano y en los forrajes, es decir, productos de menor valor. El método de gravedad es el que tiene los menores costos de inversión, es el que tiene los menores costos operativos, y como ya se discutió, no es significativamente peor que los métodos presurizados en cuanto al aprovechamiento del agua. Por lo tanto parecería una clarísima opción tecnológica si se lograra transformar lo 'complicado' en 'fácil'.

El punto ahora es tratar de discernir porqué, en las condiciones de nuestro país regar por superficie es complicado.

En primer lugar, un terreno ideal para ser regado por superficie es aquel que tiene pendiente en un solo sentido, y de aproximadamente 0,5%. En nuestro país, un terreno con tales características probablemente tendría problemas de excesos de agua y no son los generalmente utilizados por la agricultura. Es decir, que los suelos agrícolas regables, tienen casi siempre pendientes significativamente superiores a las generalmente utilizadas en los países con gran desarrollo de éstos métodos de riego.

En segundo lugar, la práctica habitual en el mundo es realizar la nivelación de los terrenos, modificando la topografía natural del terreno y llevándolo, mediante grandes movimientos de tierra, a terrenos con pendientes fijas y superficies perfectamente regulares. En el caso de Uruguay, los suelos agrícolas tienen un horizonte superficial de muy escasa profundidad, por lo que no es posible realizar grandes cortes sin dejar expuestos los horizontes sub-superficiales, de menor fertilidad natural y sobre todo, de muy malas condiciones físicas para el desarrollo de los cultivos.

Por lo tanto, es necesario adaptar el diseño de los riegos por gravedad a las condiciones topográficas y edáficas del Uruguay.

### 6.3. Adaptación del riego por superficie a las condiciones del Uruguay

En primer lugar, se deberá eliminar la micro rugosidad del terreno, como condición previa e imprescindible para regar por superficie.

Como ya fue señalado, en nuestras condiciones no se pueden hacer grandes movimientos de tierra, pero sí se deben hacer tareas de 'conformación' del terreno, emparejando su superficie. Para ello se pueden utilizar tanto las herramientas especialmente diseñadas para ello *land plane* como rastras adaptadas a tales efectos.

Así como es impensable para un productor arrocero no realizar el emparejamiento del terreno, también es impensable para la mayoría de los productores agrícolas y sus técnicos la realización de esta práctica. Por lo tanto, el primer paso para tener éxito con el riego por superficie es generar un cambio cultural que incorpore la práctica del emparejamiento del terreno, siempre que sea necesario.

En segundo lugar, se deberán sistematizar los terrenos de forma que se pueda manejar el agua eficientemente. Durán y García Petillo (2007) proponen un modelo de sistematización cuando la pendiente del terreno supera el 2,5%.

En líneas generales, para las situaciones de pendientes menores se deberán instalar las cabecezas de los cuadros con sus conducciones de agua con una pendiente mínima (0,1%) y los surcos o las melgas rectangulares con bordos irán en el sentido de la máxima pendiente.

En este caso, la forma más conveniente de aducir agua a los surcos es mediante tuberías de gran diámetro y con salidas regulables frente a cada surco. Por motivos de costos generalmente se utilizarán tuberías de polietileno colapsables, de poco espesor de pared, por lo tanto de bajo costo de inversión y corta vida útil.

La aducción de agua a las melgas se podrá hacer utilizando estas mismas tuberías, o simplemente cortando la acequia conductora frente a cada melga.

Cuando las pendientes superan ese límite del 2 – 2,5%, entonces las cabecezas de los cuadros y las conducciones irán en el sentido de la máxima pendiente, y los surcos tendrán una pendiente controlada y variable entre 0,5 y 1,75%. En este

caso, no se podrán hacer melgas con bordos, sino que se harán canales desbordables, con una pendiente del 0,1%.

La conducción en la cabecera y la aducción de agua a los surcos en este caso deberá hacerse con tuberías también con salidas regulables, pero de diámetros menores, de forma de compensar la ganancia de carga por la topografía con las pérdidas de carga por fricción.

Durán y García Petillo (2007) analizan este tema y proponen tuberías de PVC, con DN 63 mm, funcionando en unidades de 24 m (seis tubos de 6m) cada una.

En el caso de melgas en contorno, la conducción de agua en la máxima pendiente y la aducción de agua a los canales desbordables se debería hacer utilizando tuberías de polietileno de bajo valor.

Dado que se trata de desarrollar el riego de cultivos densos (forrajeros) o cultivos agrícolas en que cada vez está más extendida la siembra directa (maíz, soja, sorgo, etc.), en la mayoría de los casos no se podrá utilizar el método de riego por surcos, que es en él que se ha hecho más investigación.

En los próximos años, se deberá investigar en la tecnología del riego por melgas, para poder generar un paquete utilizable en las diferentes condiciones del Uruguay.

### **Investigación actual en tecnología de riego por melgas**

En estos momentos están comenzando o por comenzar los siguientes tres proyectos de investigación:

“Respuesta física y económica al riego suplementario en cultivos y pasturas y desarrollo de la tecnología de riego por superficie en siembra directa”. Responsable Ing. Agr. Luis Giménez, Facultad de Agronomía, EEMAC. Financiación INIA-FPTA.

“Productividad y sustentabilidad de una rotación forrajera intensiva bajo pastoreo, con incorporación de riego estratégico y nutriente de efluentes de tambos”. Responsable Ing. Agr. Ricardo Mello, Facultad de Agronomía, CRS. Financiación CSIC-SP mod. 2.

“Desarrollo de herramientas para el uso y manejo del agua en sistemas de producción”.

Responsable Ing. Agr. Jorge Sawchick, INIA La Estanzuela. Financiación INIA-FCI.

Los tres proyectos tienen algún componente de desarrollo de tecnología de riego por melgas. A fin de hacer un uso más eficiente de los recursos, se concentró toda la actividad de este componente en una serie de experimentos instalados en el Centro Regional Sur de la Facultad de Agronomía.

Se están evaluando diferentes anchos de melgas, mecanismo de redistribución del agua, espaciamientos entre canales desbordables, métodos de aducción, etc.

El objetivo final de estos trabajos es calibrar y validar los modelos matemáticos de simulación de riego por superficie, de forma de desarrollar una tecnología adaptada a las condiciones edáficas y topográficas del Uruguay, que permita optimizar el uso del agua, con costos de inversión y operación sensiblemente menores a los de otros métodos, y de una forma fácil de manejar por los regantes.

---

## **6.4. Conclusiones**

Parece clara la tendencia de los sectores agrícolas, lecheros y ganaderos intensivos a intensificar sus sistemas de producción. También es clara la demanda política, social y comercial (certificación de procesos) de que dicha intensificación se realice con una visión sostenible en el uso de los recursos naturales, principalmente suelo y agua.

Dicha intensificación deberá contar con el riego como una de las prácticas a incorporar.

Cada método o sistema de riego podrá contar con ventajas comparativas sobre los demás para determinada situación particular.

Los métodos de riego por superficie en general, y el método por melgas en particular, es el que tiene los menores costos de inversión y los menores costos operativos, por lo que podría ser una opción importante para desarrollar el riego en los cultivos extensivos.

Para que esto se concrete, se deberán desarrollar y validar modelos de riego (sistematización, conformación, aducción), que a los menores costos ya señalados agreguen un manejo eficiente del agua, el cuidado del recurso suelo, y sean fáciles de operar por los productores.

# 7. Necessidades de água e de rega das culturas: uso de modelos

L. S. Pereira

Luís Santos Pereira: Centro de Engenharia dos Biosistemas, Instituto Superior de Agronomia. Universidade Técnica de Lisboa, Portugal. Contacto: [lspereira@isa.utl.pt](mailto:lspereira@isa.utl.pt)

## 7.1. Introdução

A necessidade de água de uma cultura corresponde à procura evapotranspirativa dessa cultura em determinado ambiente e recebendo tratamentos culturais determinados. A evapotranspiração (ET) das culturas pode observar-se através de lisímetros, ser calculada com precisão recorrendo a observações micrometeorológicas ou ser estimada com base em variáveis agro-meteorológicas observadas, solução que é usada na prática, nomeadamente na gestão do regadio.

O método prático de cálculo da evapotranspiração das culturas (ETC) recorre a observações climáticas padrão e utiliza um duplo passo de estima (Allen et al., 1998; 2006b; Pereira et al., 2010): por um lado, calculando a procura climática que representa as condições ambientais através da evapotranspiração de referência (ETO); por outro lado, considerando a especificidade da cultura através de um coeficiente cultural ( $K_c$ ). Para o efeito, recorre-se a uma dupla padronização: a da cultura de referência para o cálculo da ETO, e a da cultura em causa, de forma a considerar que a mesma é cultivada em condições favoráveis à obtenção da produção máxima, condições para as quais se define  $K_c$ .

Se tais condições óptimas não se verificam, como é corrente na prática de campo, deve recorrer-se a um terceiro passo de estima, quer utilizando um coeficiente de stress ( $K_s$ ), quer ajustando o  $K_c$  às condições reais ( $K_c$  real).

As necessidades de água para a rega são estimadas através do balanço hídrico do solo cultivado. Para tanto, considera-se que parte das necessidades de água são satisfeitas pela precipitação,

pela reserva de água do solo e pela ascensão capilar e que as saídas de água correspondem à ET (transpiração pelas plantas e evaporação a partir do solo), à percolação para além da zona radicular e ao eventual escoamento à superfície do solo. Estas necessidades são posteriormente corrigidas pela eficiência da rega e com a fracção de lavagem, quando haja que controlar a salinidade do solo, para obtenção das necessidades brutas ou totais da cultura na prática de rega.

## 7.2. Conceitos de base e evapotranspiração de referência

A evaporação da água exige grandes quantidades de energia. O processo evapotranspirativo é regulado por trocas de energia à superfície dos cobertos vegetais e é limitado pela quantidade de energia disponível. Assim, é possível estimar a taxa de evapotranspiração através do balanço dos fluxos de energia. Os termos principais do balanço de energia, correspondentes a ganhos ou perdas para as superfícies vegetais, são a radiação líquida proveniente da atmosfera ( $R_n$ ), o calor sensível para o ar ou para a camada limite (H), o calor sensível a partir do (ou para o) solo (G) e a evaporação ou evapotranspiração, expressa como densidade de fluxo de calor latente ( $\lambda ET$ ). O balanço de energia pode ser expresso por:

### Equação 1

$$\lambda ET = R_n - H - G$$

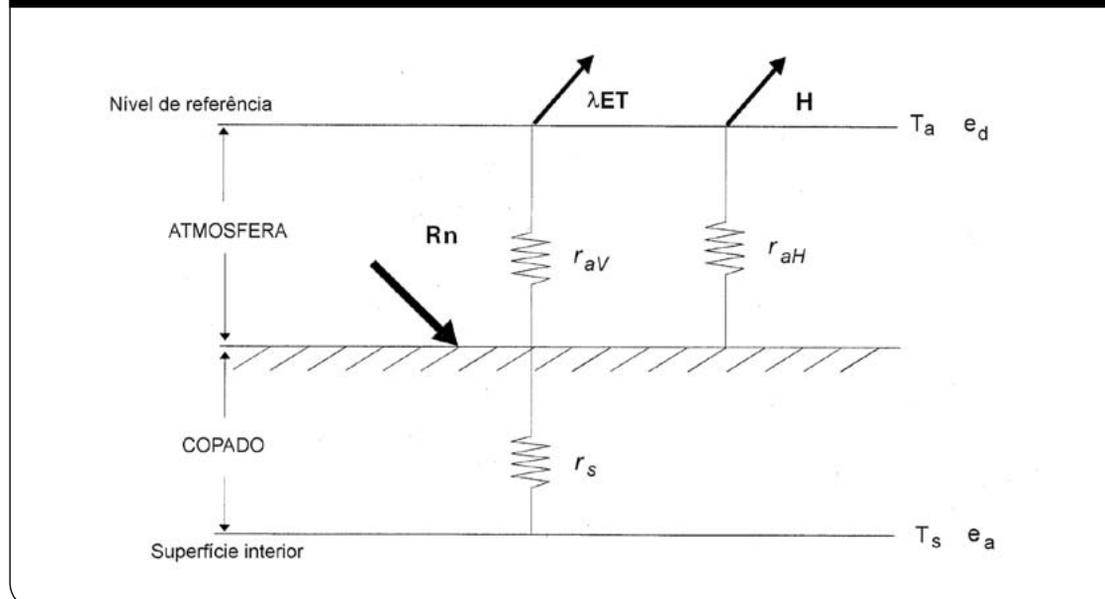
Todos os termos da (1) são expressos em unidades de energia por unidade de área horizontal e por unidade de tempo. Os termos do lado direito desta equação do balanço de energia podem ser calculados a partir de factores climáticos e de factores relativos à vegetação (factores culturais), medidos ou estimados. Os factores climáticos englobam os fluxos de radiação de curto e longo comprimento de onda, de e para a atmosfera, os efeitos sobre  $H$  resultantes do movimento horizontal do ar (velocidade do vento) e das temperaturas do ar e da superfície e os fluxos de calor do solo. Os factores culturais englobam a resistência à difusão de vapor entre o interior e o exterior das folhas e caules e a resistência à difusão de vapor desde as superfícies da vegetação ou a superfície do solo até à atmosfera.

Com objectivos de estimação, os processos de transferência turbulenta no interior e acima dos copados, bem como os efeitos da partição da radiação líquida e da energia no interior dos copados, podem ser representados por simples resistências. Para o efeito pode utilizar-se o modelo linear “big leaf” de Monteith (Monteith, 1965; Monteith e Unsworth, 1990), no qual se consideram duas resistências, de superfície e aerodinâmica, que operam em série entre o interior das folhas e um plano de referência acima da cultura (Figura 1).

A resistência de superfície ( $r_s$ ) pode ser calculada a partir da resistência à passagem dos fluxos de vapor através das aberturas estomáticas ( $r_L$ ) tomando em conta a área foliar total da cultura. Porém, engloba também a resistência aos fluxos de vapor relativos à evaporação directa da água do solo e aos fluxos não turbulentos de vapor que ocorrem no interior do copado até este atingir a superfície exterior. A resistência aerodinâmica ( $r_A$ ) representa a resistência à transferência turbulenta do vapor ( $r_{AV}$ ) entre o coberto vegetal e um plano de referência, associada à correspondente transferência vertical de calor sensível de ou para a cultura ou vegetação ( $r_{AH}$ ), como se representa na Figura 1. Estes assuntos são abundantemente tratados na literatura (e.g. Jensen et al., 1990; Allen et al., 1998; Pereira e Allen, 1999; Pereira et al., 1999; Pereira et al., 2010).

A equação do balanço de energia pode ser formulada em função de  $R_n$  e  $G$  e dos parâmetros que comandam  $H$  e  $\lambda ET$ . Assumindo que todos os fluxos são verticais (ausência de advecção), que os coeficientes de transferência relativos à difusão turbilhonar são os mesmos para  $\lambda ET$  e  $H$  e que as diferenças entre coeficientes de transferência relativos à quantidade de movimento e ao calor podem ser quantificadas através de uma simples razão, a equação de Penman-Monteith

**Figura 1:** Representação esquemática do modelo de Penman-Monteith com identificação dos termos essenciais do balanço de energia,  $R_n$ ,  $\lambda ET$  e  $H$  e das resistências aerodinâmicas para o calor e o vapor ( $r_{aH} = r_{aV} = r_a$ ) e da resistência de superfície ( $r_s$ ).



(Monteith, 1965; Monteith e Unsworth, 1990) toma a forma:

### Equação 2

$$\lambda E = \frac{\Delta (R_n - G) + \rho C_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma (1 + r_s / r_a)}$$

Onde  $(e_s - e_a)$  é o déficit de pressão de vapor (vpd) do ar ao nível do plano de referência (altura das medições meteorológicas) onde a temperatura é  $t_a$  e a pressão de vapor é  $e_a$ ,  $\rho$  é a densidade média do ar,  $c_p$  é o calor específico do ar a pressão constante,  $\Delta$  é o declive da relação pressão de vapor à saturação - temperatura do ar,  $\gamma$  é a constante psicrométrica,  $r_s$  é a resistência de superfície e  $r_a$  é a resistência aerodinâmica.

A eq. 2 pode ser utilizada directamente para calcular a  $ET$  de qualquer coberto vegetal desde que se conheçam os valores dos parâmetros culturais ao longo das várias fases vegetativas. Porém, tais parâmetros não se conhecem para a maioria das culturas. Conhecendo-se, porém, para a relva de climas temperados, torna-se possível assumi-la como cultura de referência e, normalizando a altura da cultura, de que dependem as resistências referidas, é possível dar à eq. 2 uma forma tal que seja apenas dependente do clima, isto é das variáveis climáticas correntemente observadas em estações agrometeorológicas (cf. Allen et al., 1994a, Pereira et al., 1999).

Nestas condições, a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) define-se como a taxa de evapotranspiração de uma cultura de referência hipotética, para a qual se assume uma altura de 0.12 m, uma resistência de superfície constante de 70 s m<sup>-1</sup> e um albedo de 0.23, semelhante à evapotranspiração de um extenso coberto de relva (grama) verde de altura uniforme, em crescimento activo, cobrindo totalmente o solo e bem abastecido de água. Consequentemente, como descrito em Allen et al. (1994a e b; 1998; 2006a e b; 2007b), a eq. 2 toma a forma seguinte, designada como equação FAO-PM para a evapotranspiração de referência:

### Equação 3

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + C_d u_2)}$$

onde:

$ET_o$	evapotranspiração de referência [mm d <sup>-1</sup> ]
$R_n$	radiação líquida à superfície da cultura [MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ]
$G$	densidade do fluxo de calor do solo [MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ]
$T$	média da temperatura do ar a 2 m de altura [°C]
$U_2$	velocidade do vento a 2 m de altura [m s <sup>-1</sup> ]
$(e_s - e_a)$	déficit da pressão de vapor medido a 2 m de altura [kPa]
$\Delta$	declive da curva de pressão de vapor [kPa °C <sup>-1</sup> ]
$\gamma$	constante psicrométrica [kPa °C <sup>-1</sup> ]
$C_n$	coeficiente para a cultura de referência [kJ <sup>-1</sup> kg K] resultante da conversão de segundos para dias ou horas e de coeficientes devidos à substituição das variáveis $\rho$ , $c_p$ e $r_a$ (definidas na eq. 2). $C_n = 900$ para cálculos diários e $C_n = 37$ ( $\approx 900/24$ ) para cálculos horários.
$C_d$	coeficiente de vento para a cultura de referência [kJ <sup>-1</sup> kg K], resultante da razão $r_s/r_a$ (no denominador da eq. 2)
0.408	valor para $1/\lambda$ com $\lambda = 2.45$ MJ kg <sup>-1</sup>

Para cálculos diários, assumindo  $r_s = 70$  s m<sup>-1</sup>, tem-se  $C_d = 0.34$ . Para cálculos horários é preferível distinguir as horas de noite e de dia, fazendo  $r_s = 50$  s m<sup>-1</sup> durante as horas do dia e  $r_s = 200$  s m<sup>-1</sup> durante as horas de noite (Allen et al., 2006a). Nestas condições tem-se  $C_d = 0.24$  para as horas de dia ( $R_n > 0$ ) e  $C_d = 0.96$  para as horas de noite ( $R_n \leq 0$ ). O fluxo de calor sensível para o solo ( $G$ ) assume-se como nulo para cálculos diários. Para cálculos horários far-se-há  $G_{hr} = 0.1 R_n$  durante as horas de dia e  $G_{hr} = 0.5 R_n$  durante as horas de noite.

O cálculo dos parâmetros da eq. 3 deve ser padronizado (vd. Allen et al., 1998, 2006b, 2007b; Pereira et al., 2010). Em caso de falta de observações ou de má qualidade de dados da humidade do ar, da radiação solar ou da duração da insolação, ou da velocidade do vento, pode seguir-se a metodologia de estimação de variáveis em falta indicada por Allen et al. (1998; 2006b), que permite o cálculo da  $ET_o$  diária ou mensal recorrendo apenas a observações da temperatura máxima e mínima, como demonstrado por Pereira

et al. (2003) e Popova et al. (2006). De referir que foi possível estimar os valores diários de  $E_{TO}$  a partir de simples previsões meteorológicas com erros aceitáveis, maiores em climas áridos e pequenos em climas húmidos e sub-húmidos (Cai et al., 2007; 2009).

De grande importância é a qualidade das observações e que à estação meteorológica não correspondam condições de aridez já que a eq. 3 foi estabelecida, conforme a definição acima, para condições de pleno abastecimento hídrico da vegetação acima da qual se fazem as observações. Allen et al. (1998; 2006b) propuseram metodologias simples para análise e correcção de dados que é necessário e conveniente utilizar.

### 7.3. Evapotranspiração das culturas

#### Coefficientes culturais

A evapotranspiração cultural,  $E_{TC}$  (mm d<sup>-1</sup>), é calculada multiplicando a evapotranspiração de referência,  $E_{TO}$  (mm d<sup>-1</sup>), pelo coeficiente cultural,  $K_c$  (adimensional), como vulgarizado por Doorenbos e Pruitt (1975) e adoptado posteriormente (Allen et al., 1998 e 2006b; Pereira, 2004; Pereira e Alves, 2005; Pereira et al., 2010):

#### Equação 4

$$E_{TC} = K_c E_{TO}$$

O coeficiente cultural, conforme bases teóricas analisadas por Pereira et al. (1999), representa a integração dos efeitos de três características que distinguem a evapotranspiração da cultura da de referência:

- a altura da cultura ( $h$ ), que afecta a rugosidade e a resistência aerodinâmica;
- a resistência de superfície relativa ao par cultura - solo, que é afectada pela área foliar (determinando o número de estomas), pela fracção de cobertura do solo pela vegetação, pela idade e condição das folhas que afecta a resistência estomática, e pelo teor de humidade à superfície do solo, que afecta a evaporação directa a partir deste;

- o albedo da superfície cultura-solo, que é influenciado pela fracção de cobertura do solo, pela vegetação e pelo teor de humidade à superfície do solo e influencia a radiação líquida disponível à superfície,  $R_n$ , que é a principal fonte de energia para as trocas de calor e de massa no processo de evaporação.

Durante o período vegetativo, o valor de  $K_c$  varia à medida que a cultura cresce e se desenvolve, do mesmo modo que varia com a fracção de cobertura da superfície do solo pela vegetação, e à medida que as plantas envelhecem e atingem a maturação. Por este motivo, tem sido procurado calcular  $K_c$  em função do LAI efectivo dado que a transpiração de uma cultura varia ao longo do ciclo vegetativo de forma semelhante ao LAI. No entanto, apenas se tem atingido um sucesso relativo porque a  $E_T$  da cultura varia também com a evaporação da água do solo, a qual é mais importante na fase inicial da cultura, quando a cobertura do solo é pequena, e se reduz muito em culturas que sombreiam bem o solo quando desenvolvidas.

Os valores de  $K_c$  representam a  $E_T$  para condições de cultivo óptimas, de forma a que as culturas atinjam o seu potencial produtivo, i.e., para culturas submetidas a uma gestão agronómica apropriada às condições de meio e a uma gestão da água que evite stress hídrico. Na prática, porém, a  $E_T$  real das culturas é frequentemente inferior à  $E_{TC}$  potencial (eq. 4) desde que as condições culturais ou a gestão hídrica sejam menos boas, ou devido à salinidade do solo ou da água. Convém, assim, estabelecer uma diferença clara entre a  $E_{TC}$ , que representa condições potenciais de produção (eq. 4), e a  $E_T$  relativa a condições não óptimas, que designamos por “ $E_{TC}$  real” e se define:

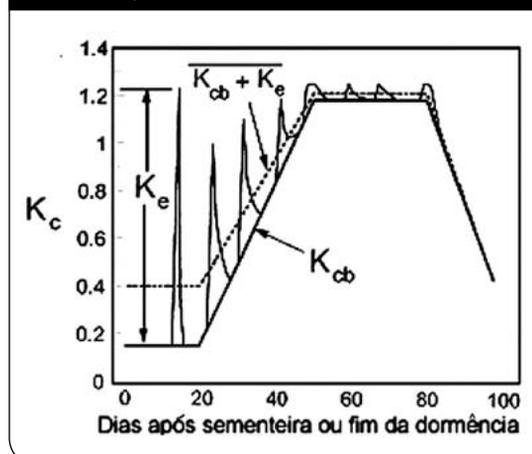
#### Equação 5

$$E_{TC \text{ REAL}} = K_{c \text{ REAL}} E_{TO}$$

Onde  $K_{c \text{ real}}$  é o coeficiente cultural “real” incorporando um conjunto de impactes de stress ambiental e cultural.  $K_{c \text{ real}}$  é obtido a partir de  $K_c$  através de vários processos referidos por Allen et al. (1998, 2006b; 2007b), nomeadamente por simples comparação entre as densidades de copado ou dos LAI da cultura com os esperados para uma cultura saudável e sem stress.

Os coeficientes culturais podem ser aproximados como  $K_c$  simples ou  $K_c$  duais (Figura 2).

**Figura 2:** Curva típica dos coeficientes culturais, mostrando o coeficiente de base,  $K_{cb}$ , o coeficiente da evaporação do solo,  $K_e$ , e o  $K_c$  simples



A forma dual é a seguinte:

#### Equação 6

$$K_c = K_s K_{cb} + K_e$$

Onde  $K_c$  é o coeficiente cultural (eq. 4),  $k_{cb}$  é o coeficiente cultural basal,  $k_s$  é o coeficiente de stress e  $k_e$  é o coeficiente de evaporação da água do solo. O  $K_c$  simples representa a soma dos valores médios de  $k_{cb}$  e  $k_e$  para cada fase vegetativa da cultura, isto é:

#### Equação 7

$$K_c = \overline{K_{cb} + K_e}$$

O coeficiente de base ( $K_{cb}$ ) é a razão entre a  $ET_c$  e a  $ET_0$  quando a camada superficial do solo se encontra seca, mas sendo o teor em água do solo na zona radicular adequado para manter a cultura em conforto hídrico. Deste modo, o  $k_{cb}$  representa o limite inferior (ou valor de base) do  $k_c$  quando se lhe subtraem os efeitos do humedecimento da camada superficial do solo pela rega ou pela precipitação. O coeficiente de stress ou de déficit de humidade do solo ( $k_s$ ) reduz o

valor de  $K_{cb}$  quando o teor de humidade do solo na zona radicular é insuficiente para manter a plena transpiração das plantas. Por seu lado, o coeficiente de evaporação do solo ( $K_e$ ) representa a evaporação do solo húmido à superfície, a qual se adiciona à transpiração representada no  $K_{cb}$  para representar a  $ET$ .

### Coefficientes culturais simples

A curva dos coeficientes culturais caracteriza tipicamente o desenvolvimento de uma cultura anual, desde a sementeira ou plantação até à colheita, sendo que as mudanças na forma da curva acompanham o desenvolvimento e a senescência da cultura (Figura 3). Naturalmente, são necessárias algumas adaptações quando se trata de culturas multianuais ou perenes.

A curva dos coeficientes culturais (Figura 3) é construída através dos passos seguintes:

Dividir o ciclo vegetativo em quatro períodos de acordo com a fenologia e o desenvolvimento da cultura: (1) período inicial, (2) período de crescimento rápido, (3) período intermédio e (4) período final.

Identificar os três valores de  $K_c$  que correspondem a  $k_{c\text{ ini}}$ ,  $k_{c\text{ mid}}$  e  $k_{c\text{ end}}$ :

$K_{c\text{ ini}}$ : valor de  $\overline{K_{cb} + K_e}$  durante o período inicial:

culturas anuais - da sementeira ou plantação até  $\approx 10\%$  de cobertura do solo

culturas perenes - desde que termina a dormência até que se estabelece o crescimento vegetativo.

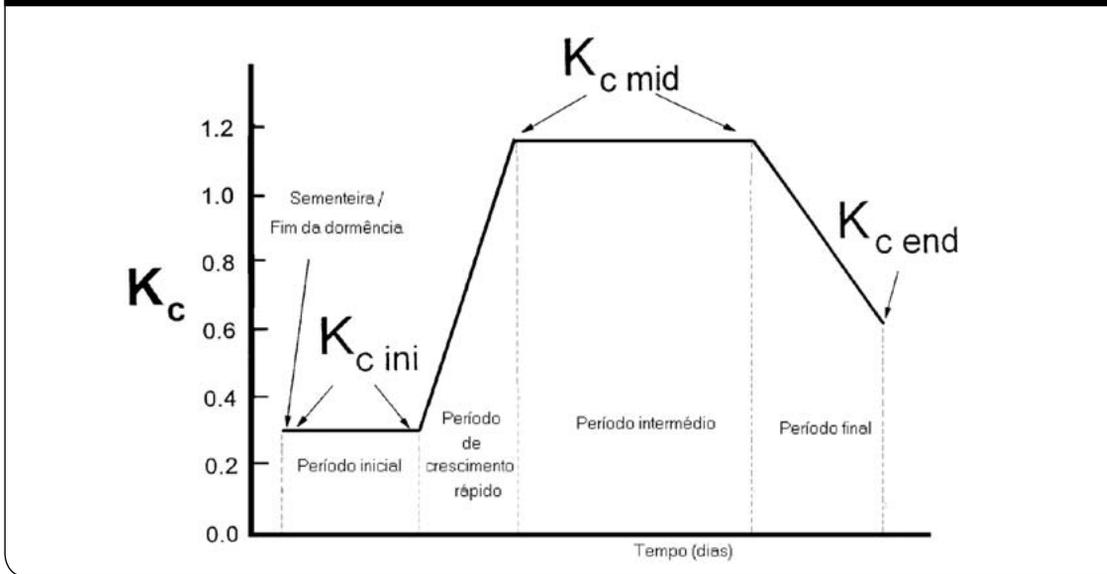
$K_{c\text{ mid}}$ : valor de  $\overline{K_{cb} + K_e}$  durante o período intermédio:

culturas anuais - desde que se estabelece a cobertura total do solo até ao início da maturação ou senescência

culturas perenes - desde que se atinge o desenvolvimento vegetativo pleno até ao início da senescência ou a mudança de coloração das folhas

$K_{c\text{ end}}$ : valor de  $\overline{K_{cb} + K_e}$  na data de colheita ou do início da dormência.

**Figura 3:** Curva dos coeficientes culturais e definição dos períodos vegetativos correspondentes (adaptado de Allen et al., 1998).



Traçar os segmentos de recta relativos aos quatro períodos de desenvolvimento como indicado na Figura 3.

As curvas dos coeficientes culturais são fáceis de definir para culturas anuais uma vez que os quatro períodos vegetativos assinalados acima (Figura 3) são fáceis de identificar. Para culturas perenes é necessário proceder à sua definição por comparação com as fases do ciclo de culturas conhecidas tomando em atenção as indicações acima (Allen et al., 1998, 2006b).

O traçado das curvas dos coeficientes culturais e os consequentes resultados do cálculo da ETC são particularmente sensíveis à definição temporal dos períodos vegetativos acima referidos – os erros resultantes são frequentemente maiores dos que os devidos à escolha dos Kc – pelo que os mesmos devem basear-se em observação das culturas. Os valores tabelados por Allen et al. (1998; 2006b; Pereira et al., 2010) podem afastar-se muito dos reais dado que estes dependem muito das variedades, das datas de sementeira ou plantação, das práticas culturais e das condições ambientais, nomeadamente as que determinam as taxas de crescimento e a maturação dos produtos finais.

Os valores de Kc mid e Kc end tabelados (Allen et al., 1998; 2006b; Pereira, 2004; Pereira et al., 2010) correspondem a condições de clima sub-húmido, caracterizadas por humidade relativa

mínima diária média  $RH_{min} \approx 45\%$  e velocidade média diária do vento  $u_2 \approx 2 \text{ m s}^{-1}$ . É absolutamente necessário corrigi-los para as condições climáticas locais, incluindo efeitos advectivos. Tomando como base considerações empíricas e a base teórica analisada por Pereira et al. (1999), tal correcção para o período intermédio faz-se através de

### Equação 8

$$K_{c \text{ mid}} = K_{c \text{ mid tab}} + 0.04 (u_2 - 2) - 0.004 (RH_{\text{min}} - 45) \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}$$

Onde o valor coeficiente cultural para o período intermédio,  $k_{c \text{ mid}}$ , se obtém do respectivo valor tabelado,  $k_{c \text{ mid tab}}$ , em função de  $u_2$ , de  $rh_{\text{min}}$  e da altura média da cultura,  $h$  [m], quando o seu desenvolvimento vegetativo é máximo. Esta correcção (eq. 8) aplica-se igualmente ao coeficiente cultural final  $k_{c \text{ end}}$  se  $> 0.45$  (valores menores correspondem a condições em que a cultura seca ou perdeu as folhas nessa data tornando desnecessário o ajustamento).

Os valores tabelados de  $k_{c \text{ mid}}$  e  $k_{c \text{ end}}$  (Allen et al., 1998; 2006b; Pereira, 2004; Pereira et al., 2010) cobrem muito insuficientemente as culturas tropicais e, por isso, deverá desenvolver-se estudo adequado que recolha e padronize a informação recolhida em países tropicais e subtropicais para as culturas típicas destas regiões.

No caso de culturas perenes arbustivas e arbóreas, caso de culturas fruteiras, porque não cobrem totalmente o solo e este pode estar nu, coberto por vegetação activa ou coberto com mulch, é necessário adaptar os valores tabelados de  $K_c$  mid e  $K_c$  end apresentados por aqueles autores à densidade de cobertura pela vegetação (cf. Allen e Pereira, 2009) ou recorrer aos  $K_{cb}$  e  $K_e$ .

Em culturas anuais, a ETC durante o período inicial é predominantemente devida à evaporação da água do solo na sua camada superficial. Consequentemente,  $K_c$  ini deve ser estimado considerando procura evaporativa da atmosfera (representada pela ETO), a frequência de humedecimentos da superfície do solo durante o período inicial, tanto pela rega como pela precipitação, as quantidades infiltradas e as características do solo para armazenar água nos 10 a 15cm superficiais e para ceder água por capilaridade até esta camada evaporativa a partir da camada inferior. Para o seu cálculo pode usar-se um método gráfico ou procedimentos de cálculo numérico como referido por Allen et al. (1998, 2005b; 2006a) e Pereira (2004). Em ambos os casos, os  $K_c$  ini calculados devem ser corrigidos pela fracção de solo humedecida ( $fw$ ), que varia entre 1.0 para a chuva e a aspersão e 0.3 a 0.4 para a rega gota a gota: por um lado, a água aplicada é considerada concentrada nessa fracção  $fw$ ; por outro lado, o  $K_c$  ini assim

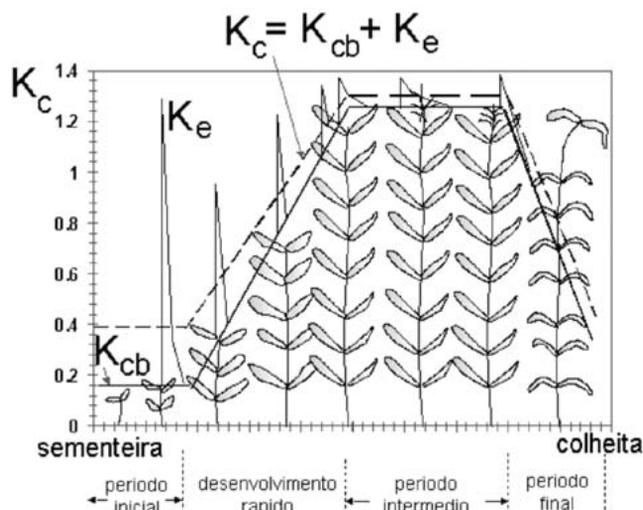
calculado deve ser multiplicado por  $fw$  visto se referir a toda a superfície da parcela.

### Coefficientes culturais duais

Para regas de alta-frequência e para culturas com cobertura parcial do solo, assim como para regiões com precipitação frequente, o uso da metodologia dos coeficientes culturais duais (Figura 4) permite produzir estimativas da evapotranspiração cultural mais exactas (Allen et al., 2005b). De facto, dividir o coeficiente cultural ( $K_c$ ) nas componentes de evaporação do solo ( $K_e$ ) e de coeficiente cultural basal ( $K_{cb}$ ) permite uma melhor percepção das fracções de água, provenientes da precipitação ou da rega, utilizadas pela cultura, assim como avaliar as vantagens de manter uma fracção do solo seca ou a utilização de “mulches” para controlar a evaporação do solo (E).

As primeiras aplicações da metodologia dos coeficientes culturais duais são relatadas por Allen (2000) para a cultura do algodão e por Liu e Pereira (2000) para as culturas de trigo e milho na China. Outra aplicação à cultura de algodão, cultura de cobertura parcial do solo, é relatada por Howell et al. (2004), que confirmaram a exactidão do método e a sua capacidade para comparação da ETC entre rega deficitária, rega para a produção máxima e sem rega. Outros estudos referem bons resultados na sua utiliza-

**Figura 4:** Coeficiente cultural de base  $K_{cb}$  relativo à transpiração da cultura e coeficiente de evaporação a partir do solo  $K_e$  para as várias fases de uma cultura



ção em pomares (e.g. Paço et al., 2009), cereais (Zhao et al., 2010) e outras culturas (Godinho et al., 2008)

Os valores de Kcb estão tabelados para numerosas culturas (Allen et al., 1998, 2006b; 2007b) ou podem ser calculados a partir dos Kc simples (Pereira, 2004; Pereira e Alves, 2005; Pereira et al., 2010) definindo-se uma curva de coeficientes culturais de base em tudo semelhante à dos Kc simples referida acima já que as fases de desenvolvimento das culturas (Figura 4) são as mesmas. Os valores de Kcb devem ser também corrigidos para o clima (Eq. 8).

O valor máximo para ke ocorre num período imediatamente a seguir a uma rega ou a chuva (Figura 4). A evaporação a partir do solo é governada pela quantidade de energia disponível à superfície do solo, a qual depende da porção da energia total que é consumida pela planta na transpiração. O coeficiente KE decresce depois de cada humedecimento à medida que aumenta a quantidade acumulada de água evaporada a partir da camada superficial do solo. Consequentemente, Ke pode ser calculado como

### Equação 9

$$K_e = K_r (K_{cmax} - K_{cb})$$

Onde Kr é coeficiente de redução da evaporação [0-1], kcb é coeficiente cultural de base, e kc max é valor máximo para Kc imediatamente a seguir a uma chuva ou uma rega. ke é limitado pela fracção de solo humedecido e exposto à luz solar, few [0.01 – 1], resultando por isso

### Equação 10

$$K_e \leq f_{ew} K_{cmax}$$

Kc max verificar-se-á imediatamente a seguir à chuva ou à rega, podendo calcular-se recorrendo à função “max” (máximo entre) por

### Equação 11

$$K_{cmax} = \max \left[ \left( 1.2 + [0.04 (U_2 - 2) - 0.004 (RH_{min} - 45)] \left( \frac{h}{3} \right)^{0.3} \right), (K_{cb} + 0.05) \right]$$

Esta equação estima a evaporação que ocorre numa superfície cultivada, independentemente do grau de cobertura. No entanto, a evaporação a partir do solo é maior na fracção de solo que não esteja coberta pela cultura e que tenha sido humedecida pela chuva ou pela rega, FEW. Nestas condições o fluxo evaporativo concentra-se na fracção de solo humedecido exposta à radiação. Quando se calcula um único Kc max, então U2, RHmin e H correspondem a valores médios referentes ao período vegetativo intermédio. Quando se realizam cálculos mais detalhados, U2 e RHmin correspondem a valores médios referentes a períodos curtos (p. ex. 5 ou 10 dias). H pode ser estimado para os mesmos intervalos de tempo; para o período inicial, H pode assumir-se artificialmente igual ao da cultura de referência (H = 0.12 m).

O método usado para estimar a evaporação a partir do solo é semelhante ao usado para calcular Kc ini, admitindo-se uma evaporação bifásica. Na primeira fase, a taxa de evaporação é máxima enquanto a evaporação acumulada, De [mm], não atinge REW. Quando De excede REW, o processo evaporativo decorre na segunda fase e a taxa de evaporação decresce proporcionalmente à quantidade de água ainda disponível para evaporar, TEW-REW. Deste modo, o coeficiente Kr (Eq. 9) pode calcular-se do modo seguinte (Figura 5):

### Equação 12a

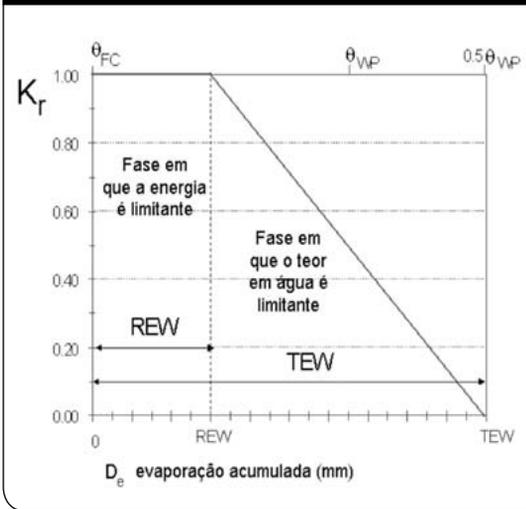
$$K_r = 1 \quad \text{para} \quad D_e \leq REW$$

### Equação 12b

$$K_r = \frac{TEW - D_e}{TEW - REW} \quad \text{para} \quad D_e > REW$$

onde REW e TEW [mm] correspondem, respectivamente à água facilmente evaporável e à água evaporável total na camada evaporativa do solo e De é a evaporação acumulada [mm] originada na fracção few de solo humedecido e exposto à radiação solar directa.

**Figura 5:** Teoria bifásica da evaporação para estimar a evaporação a partir de um solo com vegetação recorrendo ao coeficiente de decréscimo da evaporação (Allen et al., 2005a e b).



De calcula-se através de um balanço hídrico diário do solo relativo à camada superior do solo (Figura 6), com uma espessura  $Z_e$ , menor em solos ligeiros (100 mm) e maior em solos pesados ( $\geq 150$  mm) referente apenas à fracção FEW de solo húmido e exposto à radiação solar.

A equação do balanço hídrico da camada evaporativa do solo é então:

**Equação 13**

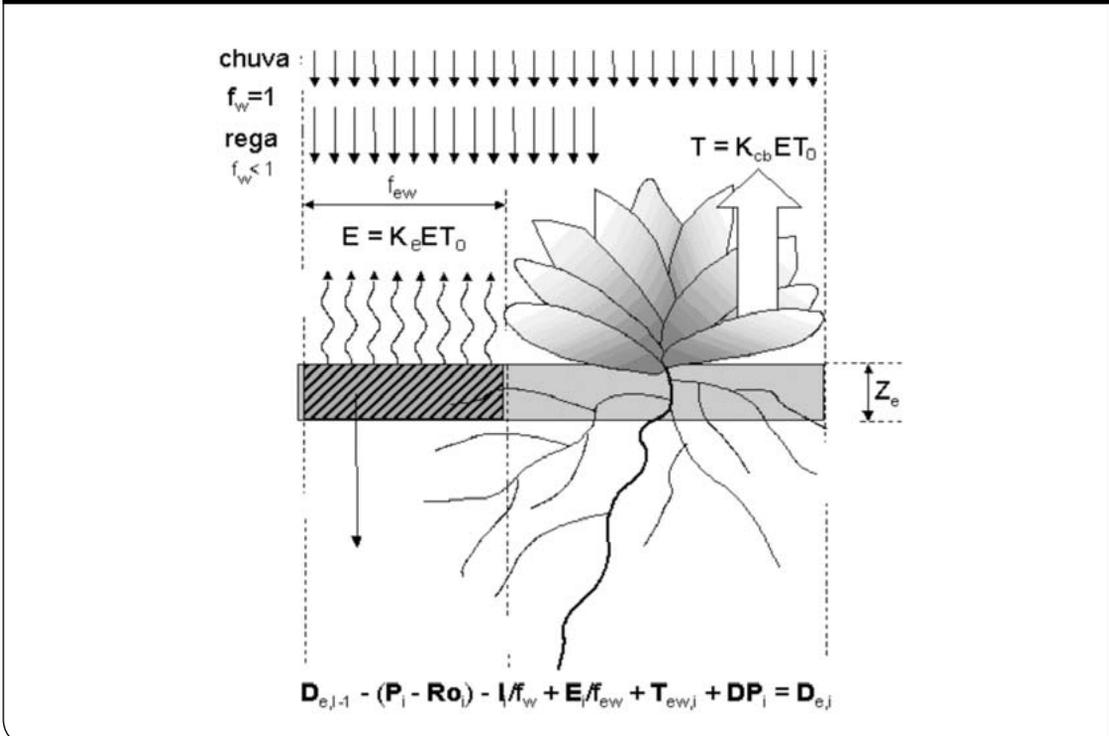
$$D_{e,j} = D_{e,j-1} - (P_j - RO_j) - \frac{I_j}{f_w} + \frac{E_j}{f_{ew}} + T_{e,j} + DP_{e,j}$$

para  $[0 \leq D_{e,j} \leq TEW]$

Onde o índice  $j$  identifica o dia para o qual a estima é feita,  $P_j$  é a precipitação [mm],  $RO_j$  o escoamento [mm], limitado a  $[0 \leq RO_j \leq P_j]$ ,  $I_j$  a lâmina média de rega que se infiltra na parcela regada [mm],  $E_j$  a evaporação a partir da fracção  $f_{ew}$  de solo humedecido e exposto à radiação solar directa [mm],  $T_{e,j}$  a transpiração [mm] originada na mesma fracção  $f_{ew}$  de solo humedecido e exposto  $[0.01 - 1]$ ,  $DP_{e,j}$  a percolação a partir da mesma fracção quando o teor de humidade excede a capacidade de campo, e  $f_w$  é a fracção de solo humedecido pela rega ou precipitação  $[0.3 - 1]$ . Os procedimentos para a estimativa destes parâmetros são dados por Allen et al. (2005b; 2006b) e Pereira et al. (2010).

Para culturas sobre as quais não há informação sobre os coeficientes culturais mas de que se conhece a fracção de cobertura do solo pela vegeta-

**Figura 6:** Balanço hídrico da camada evaporativa de um solo cultivado.



ção (Fc), Kcb mid pode estimar-se (Allen et al., 1998, 2006b):

#### Equação 14

$$K_{cb\ mid} = K_{c\ min} + (K_{cb\ full} - K_{c\ min}) \left[ \min \left[ 2 f_c, f_{c\ eff} \left( \frac{1}{1+h} \right) \right] \right]$$

Onde  $f_c$  é a fracção de solo coberto pela vegetação,  $f_{c\ eff}$  é a fracção efectiva de solo coberta por vegetação, obtida a partir de  $f_c$  de forma a considerar o efeito de sombra da vegetação sobre o solo descoberto,  $K_{cb\ full}$  é o máximo valor de  $K_{cb}$  para culturas que cobrem completamente o solo tendo a mesma altura  $h$ , e  $K_{c\ min}$  é o valor de  $K_c$  para solo seco e nu (0.15 a 0.20 ou, em períodos longos sem chuva ou rega, 0.0). As estimativas de  $f_c$  e de  $f_{c\ eff}$ , tal como de  $h$ , são forçosamente realizadas ao caracterizar a vegetação cuja evapotranspiração se pretende estimar. Por seu lado,  $K_{cb\ h}$  pode estimar-se por

#### Equação 15

$$K_{cb\ full} = \min(1.0 + 0.1h, 1.20) + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left( \frac{h}{3} \right)^{0.3}$$

Quando a vegetação ocorra em tufos isolados,  $K_{cb\ H}$  deverá majorar-se para ter em conta efeitos de advecção local. Quando a vegetação possua alto grau de controlo estomático,  $K_{cb\ H}$  deve ser corrigido por defeito.

Para o caso de culturas que cobrem o solo apenas parcialmente, é conveniente o recurso ao coeficiente de densidade da vegetação ( $K_d$ ), cuja equação se baseia na fracção de solo coberto (ou ensombrado ao meio dia) pela vegetação e na altura média das plantas como proposto por Allen et al. (2007b) e Allen e Pereira (2009):

#### Equação 16

$$K_d = \min \left( 1, M_L f_{c\ eff}, f_{c\ eff} \left( \frac{1}{1+h} \right) \right)$$

Onde  $f_{c\ eff}$  é a fracção do solo efectivamente coberto ou ensombrado ao meio dia pela vegetação [0 a 1.0],  $h$  é a altura média das plantas [m], e  $M_L$  é um multiplicador de  $f_{c\ eff}$  para impor um limite superior à transpiração relativa por unidade de área [1.2 a 2.0].

A fracção  $F_{c\ eff}$  calcula-se genericamente a partir de  $f_c$  tomando em conta a altura da cultura e o ângulo solar ao meio-dia,  $\beta$ , (Figura 7) :

#### Equação 17

$$f_{c\ eff} = \frac{f_c}{\sin(\beta)} \leq 1$$

Nestas condições, o  $K_{cb}$  das culturas cuja densidade das plantas e/ou a área foliar são inferiores à cobertura completa pode estimar-se pela equação

#### Equação 18

$$K_{cb} = K_{c\ min} + K_d (K_{cb\ full} - K_{c\ min})$$

onde  $K_{c\ min}$  é o valor mínimo de  $K_{cb}$  representando solo nu,  $K_{cb\ full}$  é o  $K_{cb}$  que teria a vegetação se ocorresse condições de cobertura total (corrigido para o clima local) e  $K_d$  é o factor densidade (eq. 16). Toma-se  $K_{c\ min} \approx 0.0$  durante longos períodos sem chuva ou rega e  $K_{c\ min} \approx 0.15$  a 0.20 em períodos em que ocorre rega ou chuva. No caso de fruteiras com solo vegetado (relva ou outra herbácea) a equação 18 toma a forma.

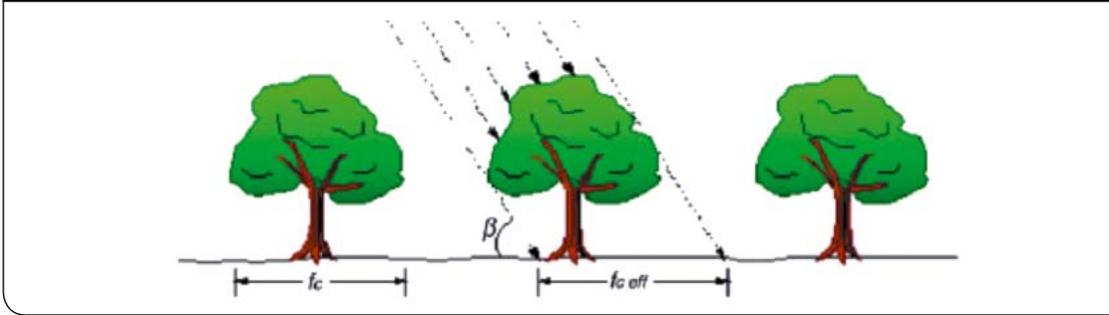
#### Equação 19

$$K_{cb} = K_{cb\ cover} + K_d (\max [K_{cb\ full} - K_{cb\ cover}, 0])$$

onde  $K_{cb\ cover}$  é o  $K_{cb}$  da cobertura do solo em ausência de folhagem. Para as fruteiras construí-se entretanto um novo procedimento de cálculo a partir da densidade dos pomares e altura das plantas cujos resultados principais originaram novas tabelas de  $K_c$  e  $K_{cb}$  para várias culturas fruteiras e vinha (Allen e Pereira, 2009).

Na Tabela 1 apresentam-se para várias fruteiras os valores de  $K_{cb\ full}$ ,  $K_{c\ min}$  e  $K_{cb\ cover}$  para fruteiras relativos aos períodos inicial, intermédio e final para uso com as equações 16 a 19 (Allen et al., 2007b). Estas aproximações pelos coeficientes culturais de base podem ser utilizadas para a normalização de valores de  $K_c$  para culturas tropicais e sub-tropicais a partir da informação disponível em estudos locais.

**Figura 7:** Esquema do cálculo da fração sombreada  $f_{c\text{ eff}}$  em função da fração coberta  $f_c$  e do ângulo do sol acima do horizonte  $\beta$  durante o período em que a ET é máxima (geralmente entre as 11.00 e as 15.00 horas).



**Tabela 1.** Valores de  $K_{cb\text{ full}}$ ,  $K_{c\text{ min}}$  e  $K_{cb\text{ cover}}$  para fruteiras relativos aos períodos inicial, intermédio e final para uso com as equações 16 a 18 (Allen et al., 2007b)

	$K_{cb\text{ full}}^{[1]}$ -ini	$K_{cb\text{ full}}^{[1]}$ -mid	$K_{cb\text{ full}}^{[1]}$ -end	$K_{c\text{ min}}^{[1]}$	$K_{cb\text{ cover}}^{[1]}$ -ini	$K_{cb\text{ cover}}^{[1]}$ -mid, end
Amêndoas						
-s/ cobertura do solo <sup>[2]</sup>	0.20	1.00	0.70[3]	0.15	--	--
- solo coberto	0.20	1.00	0.70[3]	0.15	0.75	0.80
Maçãs, cerejas, peras						
- c/ vernalização <sup>[4]</sup>	0.30	1.15	0.80[3]	0.15	0.40	0.80
- s/ vernalização <sup>[4]</sup>	0.30	1.15	0.80[3]	0.15	0.75	0.80
Alperces, pessegos, ameixas						
- c/ vernalização <sup>[5]</sup>	0.30	1.20	0.80[3]	0.15	0.40	0.80
- s/ vernalização <sup>[6]</sup>	0.30	1.20	0.80[3]	0.15	0.70	0.80
Abacate						
- s/ cobertura do solo <sup>[7]</sup>	0.30	1.00	0.90	0.15	--	--
- solo coberto	0.30	1.00	0.90	0.15	0.75	0.80
Citrinos <sup>[8]</sup>	0.80	0.80	0.80	0.15	0.75	0.80
Manga						
- s/ cobertura do solo <sup>[9]</sup>	0.25	0.85	0.70	0.15	--	--
Oliveiras <sup>[10]</sup>	0.60	0.70	0.60	0.15	0.70	0.70
Pistaquios	0.30	1.00	0.70	0.15	0.70	0.70
Nozes <sup>[12]</sup>	0.40	1.10	0.65	0.15	0.75	0.80
Uvas						
- de mesa <sup>[13]</sup>	0.20	1.15	0.90	0.15	0.70	0.70
- para vinho <sup>[13]</sup>	0.20	0.80	0.60	0.15	0.70	0.70

- [1] Geralmente, o valor de  $K_{c\text{ ini}}$  é estimado como  $0.10 + K_{cb\text{ ini}}$  dado pela eq. 18 e  $K_{c\text{ mid}}$  e  $K_{c\text{ end}}$  são estimados por  $0.05 + K_{cb\text{ mid}}$  ou  $K_{cb\text{ end}}$  dados pela Eq. 18.
- [2] fazendo  $F_{c\text{ eff}} = 0.4$ ,  $ML = 1.5$  and  $h = 4$  m para  $K_d$  na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de  $K_{cb}$  similares aos de FAO-56.
- [3] os  $K_{c\text{ end}}$  representam  $K_c$  antes da queda das folhas; depois tem-se  $K_{c\text{ end}} = 0.20$  para solo nu e seco ou vegetação morta e  $K_{c\text{ end}} = 0.50$  to  $0.80$  para vegetação em crescimento activo.
- [4] fazendo  $F_{c\text{ eff}} = 0.5$ ,  $MI = 2$  and  $h = 3$  m para  $K_d$  na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de  $k_{cb}$  similares aos de FAO-56
- [24] fazendo  $F_{c\text{ eff}} = 0.45$ ,  $MI = 1.5$  and  $h = 3$  m para  $K_d$  na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de  $k_{cb}$  similares aos de FAO-56
- [25] fazendo  $F_{c\text{ eff}} = 0.45$ ,  $MI = 1.5$ ,  $h = 3$  m para  $K_d$  na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de  $k_{cb}$  similares aos de FAO-56
- [26] fazendo  $F_{c\text{ eff}} = 0.4$ ,  $MI = 2$  and  $h = 4$  m para  $K_d$  na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de  $k_{cb}$  similares aos de FAO-56.
- [27] fazendo  $F_{c\text{ eff}} = 0.2$ ,  $0.5$  e  $0.7$ ,  $MI = 1.5$  and  $h = 2$ ,  $2.5$  e  $3$  m para  $K_d$  na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de  $K_{cb}$  cerca de 15% superiores aos valores indicados no FAO-56 para os mesmos 3 níveis de valores de  $F_{c\text{ eff}}$
- [28] fazendo  $F_{c\text{ eff}} = 0.7$  to  $0.85$ ,  $MI = 1.5$  and  $h = 5$  m para  $K_d$  na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de  $K_{cb}$  similares aos de Azevedo et al. (2003).
- [29] fazendo  $F_{c\text{ eff}} = 0.7$ ,  $MI = 1.5$  and  $h = 4$  m para  $K_d$  na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de  $K_{cb}$  similares aos de FAO-56
- [30] fazendo  $F_{c\text{ eff}} = 0.7$ ,  $MI = 1.5$  and  $h = 5$  m para  $K_d$  na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de  $K_{cb}$  similares aos de FAO-56
- [31] fazendo  $F_{c\text{ eff}} = 0.45$ ,  $MI = 1.5$ ,  $h = 2$  m para  $K_d$  na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de  $K_{cb}$  similares aos de FAO-56
- [32] fazendo  $F_{c\text{ eff}} = 0.5$ ,  $MI = 1.5$  and  $h = 2$  m para  $K_d$  na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 21 valores de  $K_{cb}$  similares aos de FAO-56

## Teledeteção para obtenção dos coeficientes culturais

O uso de imagens de satélite permite o cálculo de diversos índices de vegetação ao combinar a informação relativa à reflexão das ondas de vários comprimentos. O mais utilizado é o NDVI, que se relaciona bem com o estado hídrico das culturas e, por isso, com os  $K_c$  ou  $K_{cb}$  (Figura 8). Para o efeito pode recorrer-se a vários algoritmos e há que realizar calibração cuidadosa para adequada relação entre os NDVI e os  $K_c$  ou  $K_{cb}$  (Allen et al., 2007a).

São já numerosos os trabalhos neste domínio, destacando-se a sua aplicação para apoio a avisos de rega (Calera et al., 2005; Garatuza-Payan e Watts, 2005); para análise regional da ET e para o planeamento de recursos hídricos para a agricultura (Bastiaanssen e Harshadeep, 2005; Allen et al., 2007a).

O uso de informação produzida por teledeteção obriga à utilização de sistemas de informação geográfica (SIG) visto tal informação ser espacializada. Para o uso de tal informação require-se modelação do balanço hidrológico com bases de dados georeferenciados. Entre tais dados devem mencionar-se as propriedades hidráulicas dos solos – capacidade de campo e ponto de emurchecimento – bem como as propriedades evaporativas do solo –  $T_{EW}$  e  $REW$  –, necessárias ao cálculo da evaporação diária quando se usam  $K_c$  duais. Para tanto há que realizar o mapeamento de solos a partir de observações de campo, do

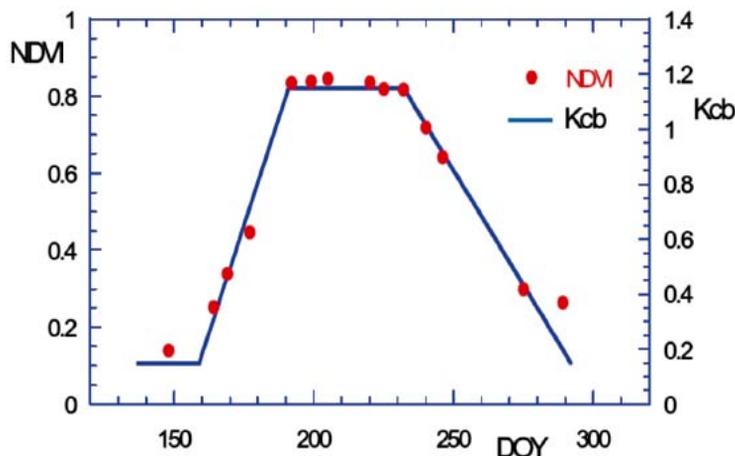
uso de funções de pedo-transferência, da análise variogramas relativos às propriedades em estudo, e de métodos de interpolação, nomeadamente o krigging (Mateus et al., 2007).

## 7.4. Necessidades de água para rega e balanço hídrico do solo

O conhecimento do balanço hídrico do solo na zona explorada pelas raízes é fundamental para uma boa gestão da água em regadio. Na condução da rega é necessário responder a três questões: quando, quanto e como regar. A resposta dependerá do grau de conhecimento dos processos ligados às transferências hídricas na zona de enraizamento da cultura regada, entre as plantas, o solo e a atmosfera.

As manifestações fisiológicas das plantas devidas à carência hídrica deverão servir como indicadores padrão para determinar quando regar. Estes indicadores podem ter carácter empírico, como cor, viçosidade, turgidez, enrolamento das folhas, ou constituir métodos científicos, como os relativos ao potencial da água nas folhas, à temperatura do copado, ou a variação dos diâmetros de caules e ramos. Por outro lado, poderão servir de padrão para a calibração prática de métodos baseados na medição de processos que ocorrem no meio onde a cultura se desenvolve, - a atmosfera e o solo, caso da medição do fluxo de seiva para estimar a taxa de transpiração

Figura 8: Relações entre a curva dos  $K_c$  e a curva dos NDVI para uma cultura de milho em Barrax (Calera et al., 2005)



da cultura, a utilização de medições de variáveis meteorológicas para estimar a ET cultural (que se analisou acima), a observação da taxa de variação do teor de água no solo por métodos como o gravimétrico, o da sonda de neutrões ou o do TDR, ou do potencial da água no solo com tensiómetros. Em todos os casos, as variáveis observadas permitem otimizar a decisão relativa à oportunidade da rega desde que os métodos estejam calibrados ou validados para a cultura e o ambiente em que esta se desenvolve.

Contudo, estes ou outros métodos não se podem dissociar dos processos de transferência hídrica no solo, pois este constitui o meio onde se efectua o armazenamento e transporte de água até às raízes das plantas. No entanto, o papel do solo é menos importante no caso de rega com pequenas dotações e de alta frequência, já que a dotação tende a ser igual ao consumo (devido contudo prevenir-se os riscos de salinização da zona de enraizamento). Porém, a dotação de rega não deverá depender apenas do intervalo entre regas ou da extracção da água pelas plantas e evaporação, mas também do teor armazenado no solo e da possibilidade de ocorrerem contribuições a partir da toalha freática através da ascensão capilar. Por outro lado, pode ocorrer percolação para além da zona radicular se as dotações forem excessivas, com arrastamento de fertilizantes, como pode ter que se aplicar dotações majoradas de uma fracção de lavagem destinada ao controlo da salinidade através da lavagem controlada dos sais da solução do solo. A dotação a aplicar depende porém do método de rega utilizado (Pereira, 1999; Pereira et al., 2002).

A determinação do balanço hídrico do solo na zona de enraizamento, com a respectiva quantificação dos termos que o constituem e a caracterização dos padrões de ocorrência dos processos de transferência hídrica (padrões de extracção radical e de escoamento de água no solo) é uma necessidade determinante para a gestão da rega e para o seu melhoramento e optimização (vd. Cameira et al., 2003, 2005)

A equação geral do balanço hídrico na zona de enraizamento de espessura  $\Delta z$  (m) e para um intervalo de tempo  $\Delta t$  (dias)

### Equação 20

$$\Delta S = (P + I_n + GW) - (Q_r + DP + ET_c)$$

Onde  $\Delta S$  é a variação do armazenamento de água no solo,  $P$  é a precipitação,  $I_n$  é a dotação de rega,  $GW$  é o fluxo acumulado de ascensão capilar,  $Q_r$  é o escoamento superficial,  $DP$  é o fluxo acumulado de percolação e etc é a evapotranspiração da cultura, sendo todos os termos expressos em mm e relativos ao período  $\Delta t$ . A Eq. 20 pode resolver-se em relação a qualquer uma das variáveis, permitindo calcular as necessidades de rega  $I_n$ .  $Q_r$  geralmente despreza-se,  $P$  observa-se, a  $ET_c$  calcula-se como se referiu atrás, enquanto  $GW$  e  $DP$  podem estimar-se por vários métodos (Liu et al., 2006).  $\Delta S$  pode observar-se ou simular-se em conjunto com  $I_n$ , como acontece nos modelos de balanço hídrico (Pereira et al., 1992; 1995).

Para a realização do balanço hídrico, porém, é mais adequado recorrer a limiares relativos aos teores de humidade do solo. Adoptando o conceito de fracção da água do solo extraível sem afectar a produção ( $p$ ) pode calcular-se a água facilmente disponível ( $RAW$ ):

### Equação 21

$$RAW = p TAW = p 1000 (\theta_{FC} - \theta_{WP}) Z_r$$

Onde  $RAW$  é a água do solo facilmente disponível e  $TAW$  é a água disponível total, ambos expressos em mm e referindo-se à profundidade  $Z_r$  da zona explorada pelas raízes [m],  $p$  é a fracção da água do solo extraível sem afectar a produção, i.e., a fracção de  $TAW$  que pode ser extraída da zona radicular sem que ocorra stress hídrico, enquanto  $\theta_{FC}$  e  $\theta_{WP}$  representam os teores de água do solo à capacidade de campo e no coeficiente de emurchecimento [ $m^3 m^{-3}$ ]. Os valores indicativos da fracção  $p$  e da profundidade explorada pelas raízes  $Z_r$  para um grande número de culturas são dados por Allen et al. (1998; 2006b), Pereira (2004) e Pereira et al., (2010). Os valores de  $p$  devem ajustar-se ao clima, nomeadamente em função de  $t$ .

O balanço hídrico do solo visando simular o seu teor de humidade para cada dia  $i$  pode escrever-se

### Equação 22

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \frac{(P_i - Q_{ri}) - I_{ni} - ET_{ci} - DP_i + GW_i}{1000Z_{ri}}$$

Onde  $\theta_i$  e  $\theta_{i-1}$  são os teor de água do solo na zona radicular [m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>] nos dias  $i$  e  $i-1$ . Esta equação pode resolver-se em ordem a  $I_n$  para o dia em que  $i$  atinge o limiar de rega pretendido. Não se regando com défice, será o correspondente à fracção  $p$  definida acima tendo-se:

### Equação 23

$$\theta_p = (1-p)(\theta_{FC} - \theta_{WP}) + \theta_{WP}$$

Se a fracção extraível for diferente por decisão de gestão do regante, incluindo por carência de água, a variável  $p$  será substituída por  $MAD$ . A quantidade de água necessária para restabelecer então o teor de água do solo à capacidade de campo é

### Equação 24

$$I_{ni} = 1000Z_{ri} (\theta_{FC} - \theta_p)$$

cujo somatório para todo o ciclo cultural, depois de corrigido para as necessidades de lavagem de sais, corresponde às necessidades líquidas de água para rega,  $IWR$ :

### Equação 25

$$IWR = \frac{ET_c - P - GW + DP + \Delta S}{1 - LR}$$

Onde  $LR$  é a fracção de lavagem e onde se considerou o termo  $Q_r = 0$  na Eq. 21.

As necessidades brutas ou globais de água de rega,  $GIWR$ , para a cultura em causa dependem do processo de aplicação da água, i.e., do método e sistema de rega, e do sistema de transporte e distribuição da água a partir da sua origem. Para o efeito, considera-se a eficiência global  $E_f$ , inclusiva da eficiência de aplicação relativa ao sistema de rega utilizado e das eficiências de distribuição e de transporte relativas à rede de rega, ou seja,

### Equação 26

$$GIWR = \frac{IWR}{E_f}$$

## 7.5. Modelos

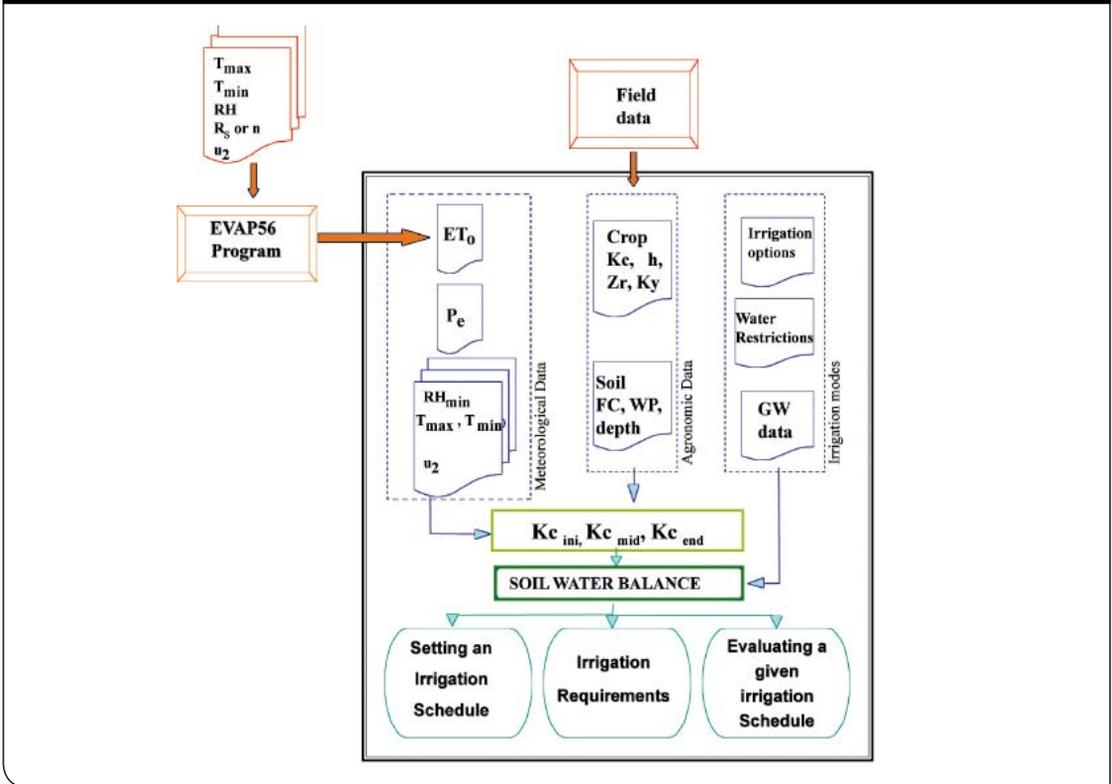
### Modelo winisareg

Bom número de modelos de simulação do balanço hídrico constituem ferramentas preciosas para a determinação das necessidades de rega e para a condução da rega (Pereira et al., 1992; 1995). De entre eles destacamos o modelo ISAREG (Teixeira e Pereira, 1992; Pereira et al., 2003), disponível em Windows – modelo WINISAREG – e capaz de lidar com a ascensão capilar e a percolação através da zona radicular (Liu et al., 2006). A explicação sumária do modelo apresenta-se na Figura 9. O modelo tem sido utilizado em vários países, incluindo Argentina, Brasil e Uruguai.

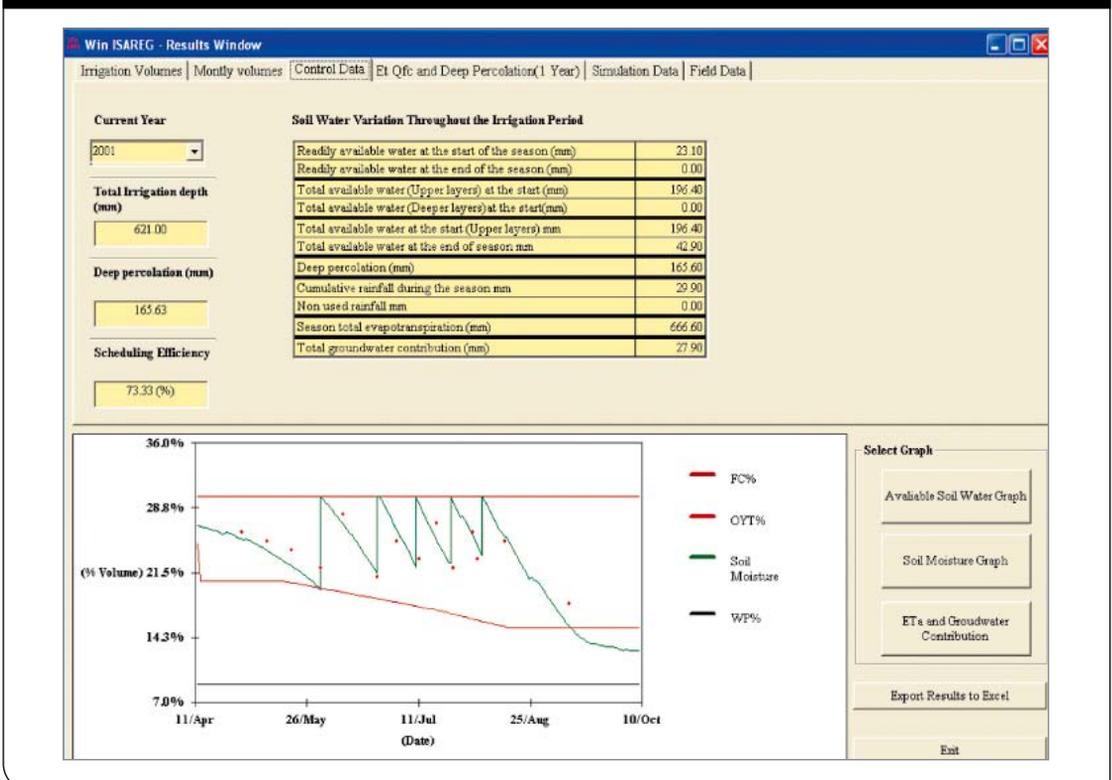
O modelo (Figura 9 e 10) é composto por um programa para o cálculo da evapotranspiração de referência com o método FAO-PM (Eq. 3), EVAP56, que inclui a estimativa de parâmetros no caso de variáveis meteorológicas em falta, por um programa para parameterizar a cultura, e por um módulo de simulação do balanço hídrico, calculando as necessidades de água e de rega das culturas com diversos passos de tempo e diversas opções de entrada de dados climáticos, de solos e da cultura.

Para a calibração e validação do modelo utilizam-se observações da água do solo ao longo do ciclo vegetativo das culturas e relativas a todo

**Figura 9:** Esquema do modelo ISAREG com indicação dos programas associados, dos dados utilizados, dos procedimentos de cálculo e do tipo de resultados



**Figura 10:** Resultados da simulação da rega do algodão para validação do modelo em Fergana, UZ (Cholpankulov et al., 2008)



o perfil de solo susceptível de ser explorado pelas raízes (Figura 11). Tal procedimento permite calibrar os  $K_c$  e  $p$  a utilizar para a cultura em estudo e nas condições ambientais em que foi cultivada, o que permite explorar o modelo com segurança na procura de soluções de gestão da rega mais adequadas. Vários exemplos estão actualmente publicados, tanto no que se refere a calibração como a validação, e.g. algodão (Cholpankulov et al., 2008); milho (Popova et al., 2006) e hortícolas (Chaterlain et al., 2010). A Figura 10 mostra uma saída de resultados de simulação no processo de calibração.

### Modelo SimDualKc

Um outro modelo de grande interesse é o SimDualKc (Godinho et al., 2008). O objectivo principal do modelo SimDualKc é desenvolver opções para a calendarização da rega, nomeadamente para culturas com cobertura parcial do solo, especialmente hortícolas e pomares, e/ou para sistemas com regas de alta-frequência como é o caso da microrrega. A aplicação foi estruturada segundo uma arquitectura de três camadas (Figura 11): a base de dados, o modelo computacional e a interface gráfica (Godinho et al., 2008).

A base de dados permite guardar a informação relativa ao solo, cultura, clima, sistema de rega e características da simulação, permitindo construir o campo da simulação. Os dados de base são inseridos no modelo, no início da simula-

ção, através de uma base de dados em MSAccess e referem-se a:

Dados meteorológicos: temperaturas mínima,  $T_{min}$ , e máxima,  $T_{max}$ , diárias, [°C]; velocidade do vento,  $U_2$  [m s<sup>-1</sup>]; evapotranspiração de referência,  $ET_0$  [mm]; precipitação efectiva,  $P_e$  [mm].

Dados de cultura: data de plantação, duração dos diferentes estágios culturais,  $L$  [dias]; valores tabelados (ou observados) do coeficiente cultural basal,  $K_{cb}$ ; comprimento máximo e mínimo da raiz,  $Z_r$  [m]; altura da cultura [m]; fracção de solo molhada pela rega,  $F_w$ ; fracção de solo coberta,  $F_c$ ; fracção de solo molhado que se encontra exposto há radiação solar,  $F_{EW}$ ; fracção de esgotamento da água do solo em conforto hídrico,  $p$ , e.

Dados de solo: profundidade da camada evaporativa,  $d$  [mm]; água facilmente evaporável,  $REW$  [mm]; água totalmente evaporável,  $TEW$  [mm]; total de água disponível,  $TAW$  [mm m<sup>-1</sup>].

O módulo computacional foi desenvolvido de modo a permitir simular o balanço hídrico em múltiplas condições: 1) com várias hipóteses de rega e sem rega; 2) para culturas que cobrem total ou apenas parcialmente o solo; 3) para solo com e sem cobertura de mulch; 4) para pomares com solo com vegetação activa ou não. Tal permite usar o modelo para (Figura12):

- a) calcular as necessidades de rega de uma cultura

Figura 11: Estrutura do modelo SimDualKc.

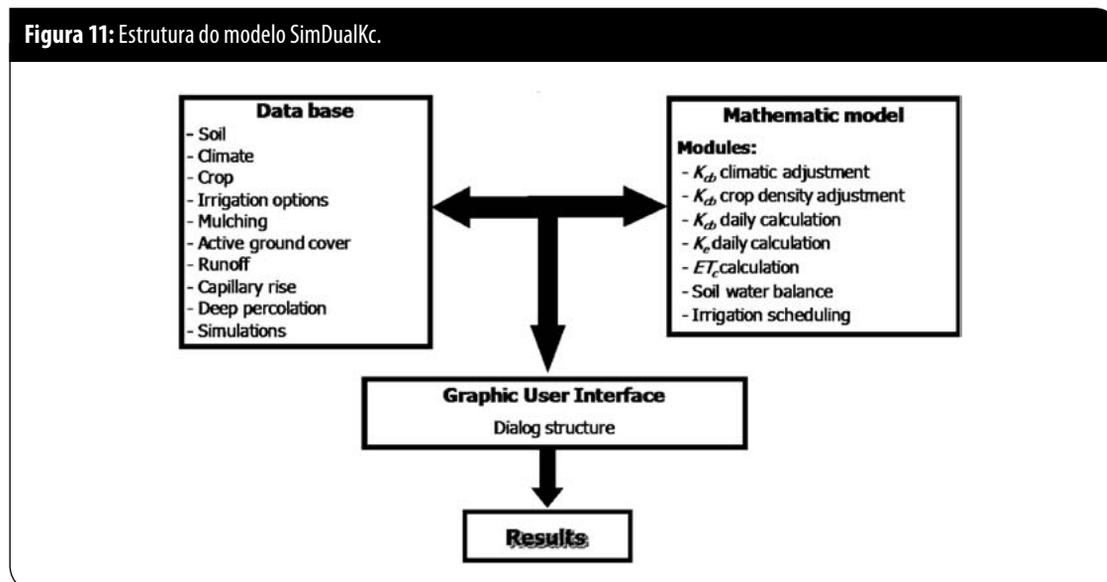


Figura 12: Diagrama do SimDualKc

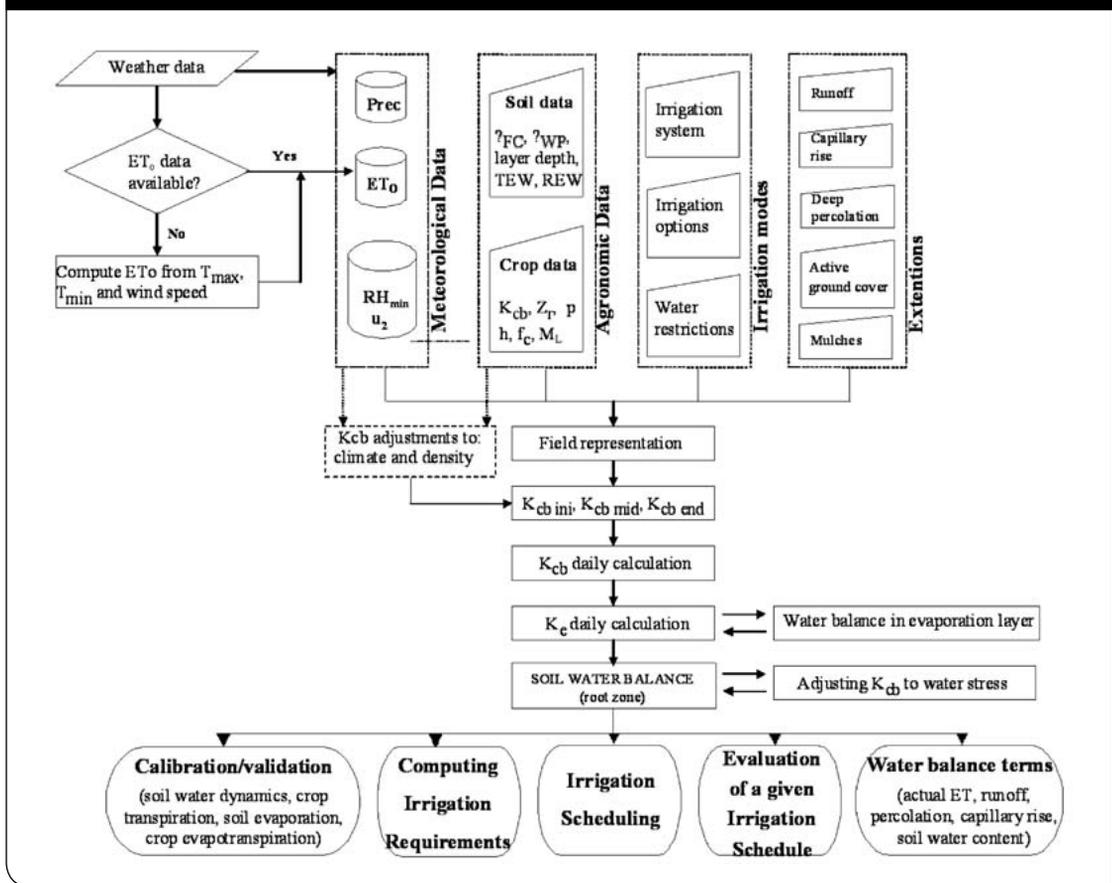
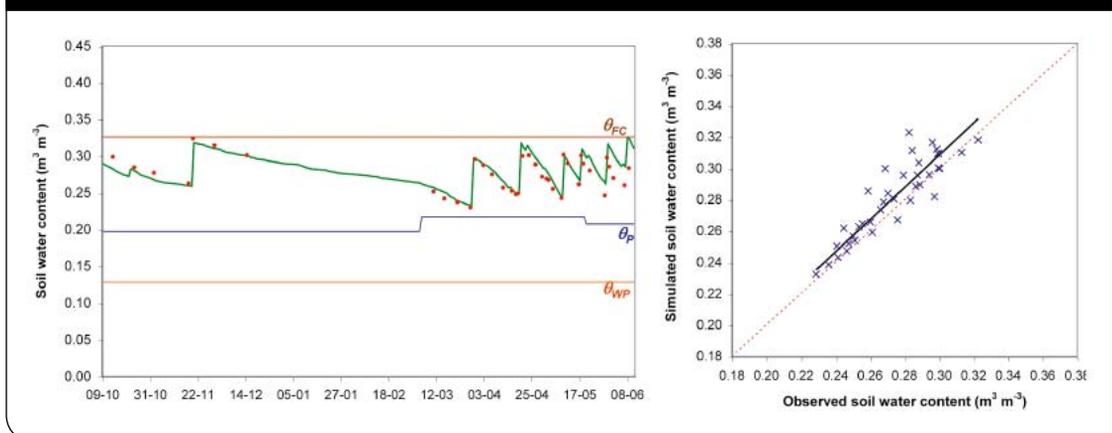


Figura 13: Validação do modelo SIMDualKc para trigo em Daxing, China (Zhao et al., 2010)



- b) estabelecer e avaliar calendários de rega
- c) calcular os termos do balanço hidrológico de qualquer superfície com vegetação.

O modelo foi testado para várias culturas, incluindo pomares (e.g. Paço et al., 2009), cereais (Zhao et al., 2010), e algodão (Figura 13), tanto em

Portugal como em vários países Mediterrânicos, na Ásia Central e na China.

Os resultados são apresentados tanto em forma tabular como gráfica e podem ser exportados para Excel. Actualmente trabalha-se no seu melhoramento em várias áreas: 1) proporcionar o

seu funcionamento em base de dados SIG; 2) adicionar um módulo de análise multicritério para fazer funcionar o modelo como ferramenta de apoio à decisão em regadio; 3) criar uma versão para funcionamento na Web.

---

## 7.6. Conclusões

Relativamente à determinação das necessidades de água das culturas deve concluir-se que a metodologia proposta pela FAO e recentemente melhorada por Allen et al. (2007b) e Allen e Pereira (2009) aqui resumida, tanto referente à definição da evapotranspiração de referência

como aos coeficientes culturais, quer os médios quer os duais, permite boa precisão de cálculo, comprovada para grande variedade de climas e regiões do mundo, desde que utilizados em relação com observações de campo.

A determinação das necessidades de rega e a definição das dotações pode ser facilitada pelo uso de modelos de simulação do balanço hídrico. Requerem-se, porém, calibração e validação bem como adequada parameterização no que respeita ao solo e à cultura. Esperam-se avanços na relação com os SIG, na adopção de análise multicritério e no recurso à Web para levar a informação aos agricultores.

# 8. Efecto de la uniformidad de riego en el rendimiento económico de un cultivo

E. López-Mata, J.M. Tarjuelo, J.A. de Juan,  
R. Ballesteros, A. Domínguez

José Arturo de Juan Valero: Contacto: [Arturo.Juan@uclm.es](mailto:Arturo.Juan@uclm.es)

José María Tarjuelo: Contacto: [Jose.Tarjuelo@uclm.es](mailto:Jose.Tarjuelo@uclm.es)

Eulogio López-Mata: Contacto: [Eulogio.Lopez@uclm.es](mailto:Eulogio.Lopez@uclm.es)

Rocío Ballesteros: Contacto: [Rocio.Ballesteros@uclm.es](mailto:Rocio.Ballesteros@uclm.es)

Alfonso Domínguez: Contacto: [Alfonso.Dominguez@uclm.es](mailto:Alfonso.Dominguez@uclm.es)

Investigadores, Centro Regional de Estudios del Agua (crea),  
Universidad de Castilla-La Mancha.

## 8.1. Resumen

Actualmente existen numerosos modelos capaces de simular el comportamiento de los cultivos bajo diferentes condiciones de estrés hídrico. Sin embargo, ninguno de estos modelos tiene en cuenta el efecto de la uniformidad de aplicación del agua con el riego sobre el rendimiento. El modelo desarrollado simula el efecto de la uniformidad sobre el rendimiento de los cultivos y su repercusión sobre el margen bruto. La aplicación del modelo a un cultivo de maíz en la provincia de Albacete, indica que el porcentaje de superficie que interesa mantener adecuadamente regado, desde un punto de vista económico es variable en función de la disponibilidad de agua de riego para el cultivo y de la uniformidad del agua en el suelo. Los resultados ofrecidos por el modelo pueden ser de gran ayuda a la hora de diseñar la estrategia de riego de cualquier zona regable con recursos hídricos limitados.

Palabras clave: coeficiente de uniformidad, riego deficitario, modelos, margen bruto.

## 8.2. Introducción

Debido a la tendencia generalizada a la disminución de disponibilidad de agua para la agricultura, y a los incrementos en los costos de la energía, se está volviendo cada vez más importante el uso eficiente del agua y la energía en la agricultura. Estos aspectos condicionan la via-

bilidad de las actividades de riego en muchas regiones del mundo.

En general, cuando se aplica un riego, no toda el agua queda almacenada en la zona del suelo explorada por las raíces, sino que parte se pierde por evaporación, escorrentía y percolación profunda, siendo muy diferente la cuantía de cada tipo de pérdida según el tipo de suelo y sistema de riego empleado. En consecuencia, la falta de uniformidad puede afectar al rendimiento de la cosecha y a la eficiencia en el uso del agua (Warrick and Gardner, 1983; Letey et al., 1984; Mantovani et al., 1995; Li, 1998).

Una continua reducción en la disponibilidad de agua para la agricultura ha creado la necesidad de mejorar la eficiencia del uso del agua por la planta (EUA, "Eficiencia del Uso del Agua" o WUE, "Water Use Efficiency") (Hatfield et al., 2001). Desde un punto de vista agronómico, la EUA es definida como la relación entre el rendimiento (Y) y la evapotranspiración del cultivo (ET) (López Bellido, 1998). Dada la dificultad de medir el agua realmente consumida por el cultivo, la mayoría de las publicaciones se refieren a la relación entre rendimiento y agua recibida por el cultivo, tanto la proveniente de la lluvia como del riego, y calculando la eficiencia del agua recibida por el cultivo (EARC o EWRC "Efficiency of Water Received by the Crop"). Howell (2001) indica que la principal forma de incrementar la EARC en la agricultura irrigada es reduciendo las pérdidas de agua y la degradación de la calidad del agua (aspectos ambientales) y relocalizar el

agua a otros usos de mayor prioridad (aspectos sociales).

La uniformidad de rendimiento del cultivo, cuando el agua es el único factor limitante, depende de la uniformidad del agua disponible en la zona radicular. Ésta es condicionada por los efectos de los riegos acumulados recibidos, la intercepción del agua por la canopia y su redistribución, la dinámica del agua en el suelo y del desarrollo del sistema radicular del cultivo. (Stern and Bresler, 1983; Li and Kawano, 1996; Chen et al., 2004). Para obtener la lámina bruta de aplicación para satisfacer los requerimientos hídricos del cultivo, debería considerarse la uniformidad de agua del suelo más que la uniformidad de aplicación de eventos individuales de riego. Una buena aproximación a la uniformidad de agua del suelo es el valor correspondiente al conjunto de eventos de riego, al menos cuando el interval entre riegos es menor que tres o cuatro días (Ortega et al., 2004a and b; de Juan et al., 2008; Jiménez et al., 2009).

Desde mediados del pasado siglo se vienen desarrollando numerosas ecuaciones para simular el comportamiento de los cultivos bajo diferentes condiciones de estrés (De Wit, 1958; Stewart et al., 1977; Sudar et al., 1981), fertilización (Cerrato and Blackmer, 1990; Stöckle and Debaeke, 1997; Errhebi et al., 1998), salinidad del agua de riego (Allen et al., 1998; García et al., 2006; Pereira et al., 2007), competencia con malas hierbas (Kropff and Spitters, 1993; Vitta and Satorre, 1999; Mansilla, 2005), etc. Estas

ecuaciones han sido utilizadas para desarrollar modelos complejos que permiten simular el comportamiento de los cultivos bajo un amplio rango de condicionantes (ISAREG: Teixeira and Pereira, 1992; CROPSYST: Stöckle et al., 1994; WOFOST: Boogaard et al., 1998; etc.). Sin embargo, ninguno de estos modelos tiene en cuenta el efecto de la uniformidad de la distribución del agua en el suelo ocasionado por la heterogeneidad del agua aplicada con el riego sobre el rendimiento del cultivo y el margen bruto obtenido.

### 8.3. Objetivo

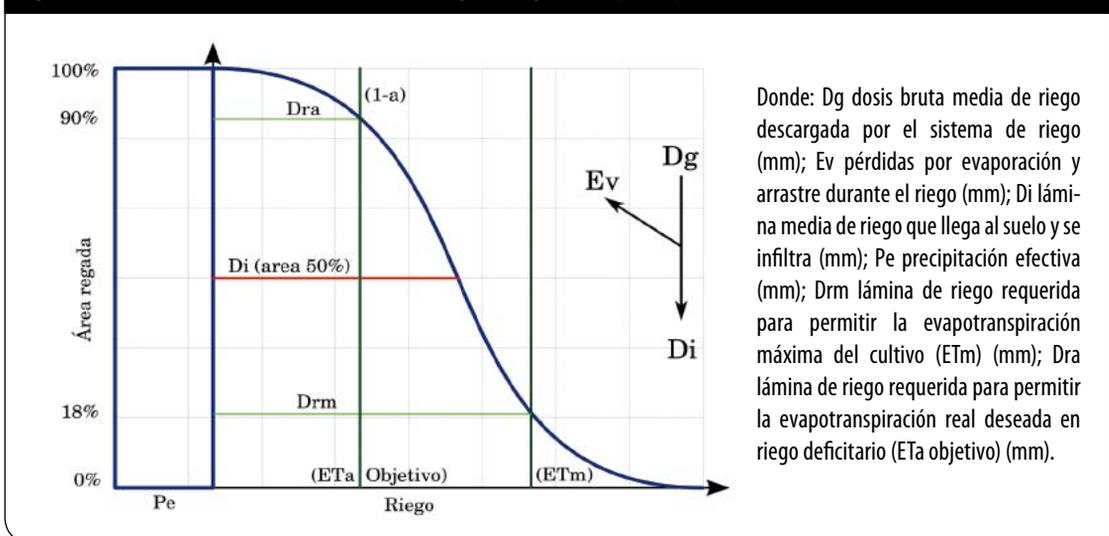
El objetivo de este trabajo ha sido desarrollar una metodología capaz de optimizar la aplicación del agua de riego a los cultivos, buscando maximizar el margen bruto para unas disponibilidades de agua limitadas, teniendo en cuenta la uniformidad del agua de riego.

### 8.4 Materiales y métodos

La función de distribución normal es capaz de reproducir con suficiente precisión la distribución del agua aplicada con sistemas de riego por aspersión y goteo, así como la distribución de agua en el suelo. (Seginer, 1987; Keller y Bliesner, 1990; Anyoji y Wu, 1994; Mantovani et al., 1995; de Juan et al., 2008; Jiménez et al., 2009).

La Figura 1 muestra un diagrama típico de la distribución del agua en un riego presurizado cuando se infiltra en el suelo una lámina de riego  $D_i$ .

**Figura 1:** Función normal acumulada de distribución del agua de riego sobre la parcela para un determinado Coeficiente de Uniformidad (CU).



La distribución de la lámina infiltrada ( $D_i$ ) puede aproximarse con una distribución normal acumulada de media ( $D_i$ ) y desviación estándar ( $\sigma$ ), que dependerá de la uniformidad del agua aplicada por el sistema de riego (Keller y Bliesner, 1990, Tarjuelo, 1999).

Como consecuencia de la falta de uniformidad, implícita a cualquier sistema de riego, habrá una determinada proporción del área regada (a) que recibirá la altura requerida para que el cultivo pueda alcanzar la evotranspiración pretendida ( $D_{ra}$ ) o más, mientras que la porción (1-a) habrá recibido una lámina inferior.

Normalmente área adecuadamente regada (a) es el área de la parcela de cultivo que permite satisfacer la evapotranspiración máxima del cultivo (ET<sub>m</sub>) con la lámina infiltrada (DRM), que en la Figura 1 sería de un 18%. Este concepto puede ser ampliado para el caso de un determinado objetivo de riego deficitario (ETA objetivo), donde se debe infiltrar una lámina ( $D_{ra}$ ), que en la Figura 1 corresponde a un área adecuadamente regada del 90%.

Para medir la uniformidad de distribución del agua riego, el coeficiente de uniformidad (CU) de Christiansen (1942) (EC. 1) suele ser el más utilizado.

### Ecuación 1

$$CU = 100 \cdot \left( 1 - \frac{|\sum V_i - D_i|}{D_i \cdot n} \right)$$

Donde:  $D_i$  valor medio del agua en los puntos de control (mm);  $n$  número total de puntos de control;  $V_i$  valor del contenido de agua de cada punto de control (mm).

La uniformidad del rendimiento de los cultivos, cuando el agua es el único factor limitante, depende de la uniformidad del agua disponible en su zona radicular. Ésta, está condicionada por: el efecto de los riegos acumulados, la interceptación del agua por parte de la cubierta vegetal y su posterior redistribución, la dinámica del agua en el suelo, y el desarrollo del sistema radicular del cultivo (Stern y Bresler, 1983; Li y Kawano, 1996; Chen et al., 2004). Para el cálculo de la lámina bruta a aplicar a partir de las necesidades de agua requeridas por el cultivo debe utilizarse

la uniformidad del agua en el suelo, y no la uniformidad de aplicación de agua por el sistema de riego, incluyendo además el valor correspondiente al conjunto de riegos, al menos cuando el intervalo entre riegos es inferior a tres o cuatro días (Ortega et al.; 2004a y b). En sistemas fijos de riego por aspersión en maíz (Martínez 2004, de Juan et al., 2008), en cebolla (Jiménez 2008, Jiménez et al., 2009), y en riego con equipos pivote en remolacha azucarera (Ortiz et al., 2009), ponen de manifiesto que con valores de  $CU \geq 80\%$  en riegos individuales, se pueden alcanzar fácilmente uniformidades de agua en el suelo próximas al 90%.

El coeficiente de variación (CV) es el cociente entre la desviación estándar de las alturas de agua aplicadas en los diferentes puntos de la parcela ( $\sigma$ ) y la altura media de agua infiltrada ( $D_i$ ) (Ec. 2).

### Ecuación 2

$$CV = \frac{\sigma}{D_i}$$

Al tratarse de una distribución normal es posible relacionar CU con CV (Warrick et al., 1989; Heermann et al., 1991) (Ec. 3).

### Ecuación 3

$$CV = \frac{1 - CU}{\sqrt{2/\pi}}$$

Con el fin de estimar el efecto sobre el rendimiento de los cultivos del CU medio del agua en el suelo correspondiente al conjunto de riegos, se divide la parcela de riego en "m" porciones iguales discretizando así la distribución normal acumulada, con lo que la lámina de agua de riego que recibe cada porción será distinta. El valor de "m" es definido por el usuario.

Para conocer cuál es el valor del agua infiltrada en cada una de las m subparcelas para un riego unitario ( $D_i = 1$ ) que se infiltrará en la subparcela media, se utilizan la distribución normal

estándar inversa, la desviación estándar ( $\sigma$ ) y la posición correspondiente a la subparcela ( $A_q$ ). En este caso, como  $D_i = 1$ , será  $\sigma = cv$  (Ec. 2). El valor de  $A_q$  puede asociarse al punto medio de la subparcela considerada mediante la Ec. (4).

#### Ecuación 4

$$A_q = \frac{q - 0.5}{m}$$

Donde:  $A_q$  es la posición de la subparcela  $q$  (variable entre 1 y  $m$ ) dentro del área total de la parcela;  $m$  es el número de subparcelas en que se divide la parcela total.

De esta manera, cada riego es transformado en  $m$  riegos diferentes, distribuidos en las  $m$  subparcelas definidas por el usuario, aproximando así lo que ocurre en un riego real en la parcela. La metodología anterior permite al modelo incorporar el efecto de la uniformidad del agua disponible en el suelo sobre el rendimiento de los cultivos.

#### Cálculo del rendimiento del cultivo

Para estimar el rendimiento de un cultivo para un determinado nivel de déficit hídrico se utiliza la ecuación de Stewart et al. (1977) (Ec. 5), considerando cuatro etapas en el proceso de crecimiento y desarrollo de los cultivos. Esta metodología es válida para la mayoría de las especies herbáceas, pudiendo obtener también un buen nivel de aproximación para algunas especies leñosas (Stewart et al., 1977, Doorenbos y Kassam, 1979).

#### Ecuación 5

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^4 \left( 1 - k_{yi} \left( 1 - \frac{ET_{ai}}{ET_{mi}} \right) \right)$$

Donde:  $Y_a$  rendimiento obtenido (kg/ha);  $Y_m$  rendimiento máximo en la zona, bajo condiciones óptimas de cultivo y en ausencia de estrés hídrico (kg/ha);  $k_{yi}$  coeficiente de estrés del cultivo para la etapa  $i$  de desarrollo del cultivo;  $ET_{ai}$  evapotranspiración real acumulada en la etapa  $i$  (mm);  $ET_{mi}$  evapotranspiración máxima acumulada en la etapa  $i$  (mm) para producir  $Y_a$  e  $Y_m$  respectivamente.

El cálculo diario de la ET<sub>m</sub> se realiza a partir de los valores de ET<sub>0</sub> y  $k_c$  del cultivo, calculando la ET<sub>0</sub> a partir de la ecuación de FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) o la de Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1985).

Para el cálculo de la ET<sub>a</sub> bajo condiciones de déficit hídrico se utiliza la expresión propuesta por Allen et al. (1998) (Eq. 6)

#### Ecuación 6

$$\frac{ET_a}{ET_m} = K_{se} = \frac{TAW - Drs}{TAW - RAW} = \frac{TAW - Drs}{(1 - p)TAW}$$

Donde  $K_{se}$  es el factor de reducción de evapotranspiración dependiendo de la disponibilidad de agua en el suelo (adimensional) (0 - 1), donde  $K_{se}=1$  cuando  $Drs \leq RAW$ ;  $Drs$  es el déficit de humedad en la zona radicular (mm) en un momento dado;  $RAW$  es el agua fácilmente disponible en la zona radicular (mm);  $TAW$  el total de agua disponible en la zona pedicular (mm);  $p$  es la fracción de  $TAW$  que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin sufrir estrés hídrico

El modelo permite obtener el calendario de riegos para cada relación ET<sub>a</sub>/ET<sub>m</sub> objetivo. Para ello calcula diariamente el contenido de agua en la zona radicular mediante un balance de entradas (riego, lluvia y, en su caso, incremento de la profundidad radicular) y salidas (ET y percolación). Bajo condiciones de estrés hídrico, la Eq. (6) permite determinar la cantidad de agua a aplicar mediante el riego para intentar conseguir la relación ET<sub>a</sub>/ET<sub>m</sub> objetivo. Puesto que es necesario trabajar con cuatro etapas del cultivo, el modelo busca la combinación de déficit por etapas que conseguiría la máxima producción para una determinada relación ET<sub>a</sub>/ET<sub>m</sub> global.

Para una determinada relación ET<sub>a</sub>/ET<sub>m</sub> objetivo, que puede ser distinto para cada una de las cuatro etapas del cultivo, el modelo establece un calendario de riegos que trata de conseguir dicho objetivo. Una vez determinado el calendario de riegos, el modelo calcula las relaciones ET<sub>a</sub>/ET<sub>m</sub> realmente conseguidas en cada una de las etapas.

Una vez conseguidas las producciones obtenidas para cada una de las  $m$  subparcelas, se

procede a su integración utilizando las reglas se Simpson de 1/8 y 3/8 de forma combinada para una mayor precisión.

### Optimización de la distribución del agua de riego por etapas

Puesto que los cultivos presentan una sensibilidad al estrés hídrico diferente a lo largo de su desarrollo vegetativo, según la relación  $ETA/ETM$  en cada una de las etapas de desarrollo del cultivo es posible obtener producciones distintas para una misma relación  $ETA/ETM$  total (Mitchell et al., 1984; Fabeiro et al., 2003). Por lo tanto, para una misma  $H_b$  es posible mejorar el rendimiento final si se reduce el estrés hídrico durante las etapas más sensibles, restringiendo el riego en el resto de etapas. Esta técnica se denomina Riego Deficitario Controlado (Jordan, 1983; English, 1990).

Para realizar una aproximación de la distribución del déficit en cada una de las cuatro etapas del cultivo tratando de conseguir el máximo rendimiento final, se ha desarrollado una metodología, aplicable a una situación del pasado, por ejemplo al año climático medio. El procedimiento utilizan los valores de  $k_y$  y de la  $ETM$  acumulada en cada una de las etapas. Puesto que el rendimiento del cultivo depende del déficit en las cuatro etapas consideradas en la Eq. (5), para cualquier relación  $(ETA/ETM)=K$  en el ciclo global del cultivo, se deberá cumplir que:

### Ecuación 7

$$K \cdot ET_m = ET_a = ET_{a1} + ET_{a2} + ET_{a3} + ET_{a4}$$

Lo que permite poner  $ETA1$  en función de la  $ETA$  en las otras tres etapas:

### Ecuación 8

$$ET_{a1} = K \cdot ET_m - ET_{a2} - ET_{a3} - ET_{a4}$$

Despejando  $Ya$  de la Eq. (5), y teniendo en cuenta que  $Ym$  es conocida, así como los valores de  $k_y$  y  $ETM$  en cada etapa, pueden realizarse las derivadas parciales de  $Ya$  respecto de  $ETA2$ ,  $ETA3$ ,  $ETA4$ . Igualando a cero estas derivadas puede obtenerse el valor máximo de  $Ya$  en función de la  $ETA$  para cada una de las cuatro etapas consideradas Eq. (9a, 9b y 9c). Esta metodología utiliza la ecuación de Stewart sin tener en cuenta los posibles efectos que el déficit de agua, el coeficiente de uniformidad, el tipo de suelo y/o la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo tendrían sobre los valores máximos de  $Ya$  alcanzados en cada etapa. Esto hace que la aproximación pueda ser mejor para bajas relaciones  $ETA/ETM$  y para baja capacidad de retención de agua en el suelo.

Los valores de  $ETAi$  en Eq. (9a, 9b y 9c) deben cumplir las restricciones de:  $ETAi \geq ETais$  correspondiente a la situación de secano, y  $ETAi \leq ETMi$ .

### Ecuación 9

$$ET_{a2} = \frac{K \cdot ET_m}{4} + \frac{3}{4} ET_{m2} \left(1 - \frac{1}{k_{y2}}\right) - \frac{1}{4} \left( ET_{m1} \left(1 - \frac{1}{k_{y1}}\right) + ET_{m3} \left(1 - \frac{1}{k_{y3}}\right) + ET_{m4} \left(1 - \frac{1}{k_{y4}}\right) \right) \quad 9a$$

$$ET_{a3} = \frac{K \cdot ET_m}{4} + \frac{3}{4} ET_{m3} \left(1 - \frac{1}{k_{y3}}\right) - \frac{1}{4} \left( ET_{m2} \left(1 - \frac{1}{k_{y2}}\right) + ET_{m1} \left(1 - \frac{1}{k_{y1}}\right) + ET_{m4} \left(1 - \frac{1}{k_{y4}}\right) \right) \quad 9b$$

$$ET_{a4} = \frac{K \cdot ET_m}{4} + \frac{3}{4} ET_{m4} \left(1 - \frac{1}{k_{y4}}\right) - \frac{1}{4} \left( ET_{m2} \left(1 - \frac{1}{k_{y2}}\right) + ET_{m3} \left(1 - \frac{1}{k_{y3}}\right) + ET_{m1} \left(1 - \frac{1}{k_{y1}}\right) \right) \quad 9c$$

El proceso requiere explorar las 34=81 soluciones diferentes, seleccionando aquella que origine el rendimiento máximo ( $Y_a \max$ ), cumpliendo todas las restricciones.

Una vez estimados los déficits en cada una de las etapas que conducen al máximo rendimiento del cultivo, se calcula el calendario de riegos para la subparcela media (área 50% en Figura 1) y se determina el agua recibida y la producción obtenida en el conjunto de subparcelas en que se ha dividido la parcela regada para tener en cuenta la uniformidad de distribución del agua en el suelo.

### Cálculo del Margen Bruto (GM)

El cálculo de margen bruto se realiza mediante la Eq. (10).

#### Ecuación 10

$$GM = Y_a \cdot HP + Y'_a \cdot HP' + Sub - Dg \cdot WC - VC$$

Donde: GM es el margen bruto (€/ha); Y es el rendimiento del producto principal (kg/ha); PV es el precio de venta del producto principal (€/kg); Y' es el rendimiento del subproducto (kg/ha); PV' es el precio de venta del subproducto (€/kg); cv son los costes variables de producción (€/ha); Hb es la lámina bruta de agua descargada por el sistema de riego (m<sup>3</sup>/ha); ca es el coste del agua de riego (€/m<sup>3</sup>); Subs son los subsidios percibidos por los agricultores (€/ha). En esta ecuación se han separado los costes imputados a la aplicación del agua de riego para poder estudiar el efecto del coste del agua sobre el resultado final.

El modelo tiene en cuenta que distintos niveles de rendimiento suponen un uso diferente de los medios de producción y por tanto de los costes variables. Por este motivo, el usuario debe introducir el importe de los costes variables dependiendo del objetivo de producción.

## 8.5. Resultados y discusión

Para llevar a cabo la calibración del modelo se ha elegido un cultivo de maíz en la zona de Albacete (España), donde el rendimiento máximo esperado del cultivo, sin restricciones en el proceso productivo (si el cu del sistema de riego fuera del 100% y la relación  $\eta_a/\eta_m = 1$ ), sería

de 17.000 kg/ha. La Tabla 1 muestra los datos económicos asociados al cultivo del maíz en la zona. Los datos climáticos utilizados corresponden al año 2005, que fue un año seco, con 250 mm de lluvia anual y 45 mm durante el periodo de cultivo.

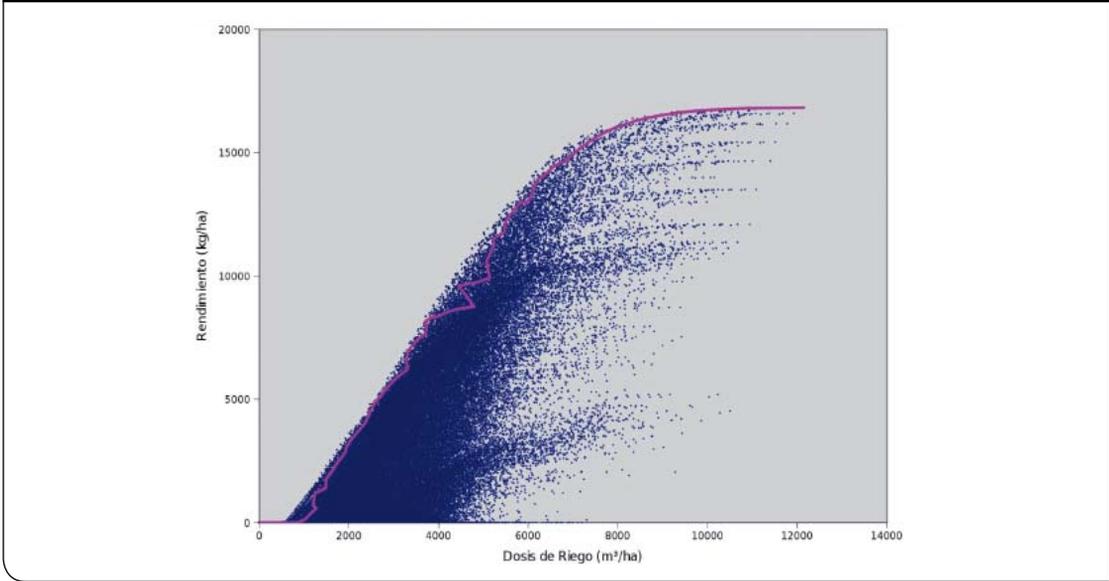
**Tabla 1.** Datos económicos asociados al cultivo del maíz en el sistema agrario Mancha Oriental.

Datos de maíz	
Precio de venta (€/ton)	142.30
Subsidios (€/ha)	346.50
Coste del agua (€/m <sup>3</sup> )	0.09
Estimación de los costes variables	
Rendimiento (kg/ha)	Costes variables (€/ha)
17,000	1,451.02
13,625	1,318.74
10,800	1,182.74
8,300	1,043.28
0	922,30

Para una determinada dosis de riego aplicada al cultivo, pueden obtenerse diferentes producciones dependiendo del calendario de riegos utilizado. En la Figura 2 se muestran los resultados correspondientes a 146410 calendarios de riego simulados, para un  $cu=85\%$ , variando la relación  $\eta_a/\eta_m$ , y la proporción de área adecuadamente regada "a", donde se puede comprobar que para una misma aportación de agua de riego se obtienen producciones muy diferentes.

La mayor eficiencia en el uso del agua (WUE), entendida ésta como el rendimiento del cultivo por cada m<sup>3</sup> de agua utilizado, corresponde a la envolvente superior de la nube de puntos obtenida en la Figura 2, al corresponder a los puntos la producción máxima para cada una de las láminas de riego brutas aplicadas. Pero simular una gran cantidad de calendarios de riego para obtener la envolvente es muy costoso en tiempo de cálculo, por ese motivo el modelo hace uso del optimizador de déficit por etapas descrito anteriormente en la metodología. Su efectividad puede comprobarse superponiendo la curva obtenida por el modelo a la nube de puntos de la simulación de 146410 calendarios de riego (Figura 2). El optimizador de déficit descrito se acerca bastante a la envolvente con tiempos de

**Figura 2:** Simulación de 146410 calendarios de riego y resultados del optimizador de distribución del déficit por etapas (línea continua).



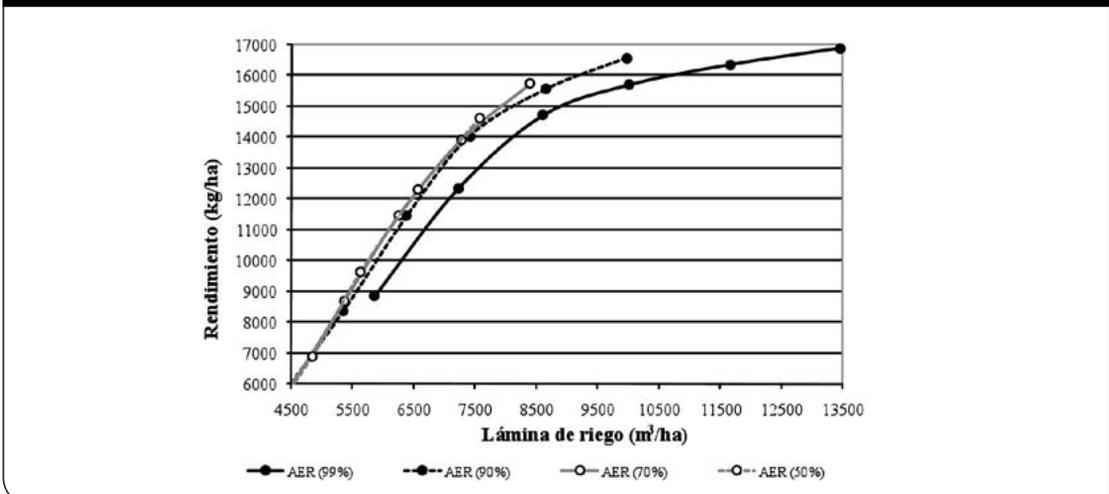
cálculo pequeños. Actualmente se está trabajando en otro optimizador de déficit mucho más complejo, pero que se espera que se aproxime aún más a la envolvente óptima del cultivo.

En la Figura 3 se muestra la relación “rendimiento vs. lámina bruta de riego” para distintos porcentajes de área adecuadamente regada, considerando un  $CU = 85\%$ , para seis valores de la relación  $ETA/ETM$  distintas (1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5), lo que corresponde a cada uno de los puntos de cada curva.

Los resultados muestran que no es razonable pretender dejar bien regada el 100% de la parcela ya que, para una misma lámina bruta de riego aportada ( $Dg$ ), se obtendría menos producción que dejando bien regada menor proporción de parcela. Según esto, puede ser suficiente dejar bien regada o sobre regada entre el 70-80% de la parcela. En este caso, la mayor eficiencia en el uso del agua se consigue con valores de “a” entre 50% y 70%.

La Figura 4 muestra el efecto del área adecuadamente regada (a) sobre el rendimiento cuando se

**Figura 3:** Relación “rendimiento vs. lámina bruta de riego” para cuatro porcentajes de área adecuadamente regada (99%, 90%, 70%, 50%), para un  $CU = 85\%$ , considerando seis valores de la relación  $ETA/ETM$  distintas (1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5), (lo que corresponde a cada uno de los puntos de cada curva).



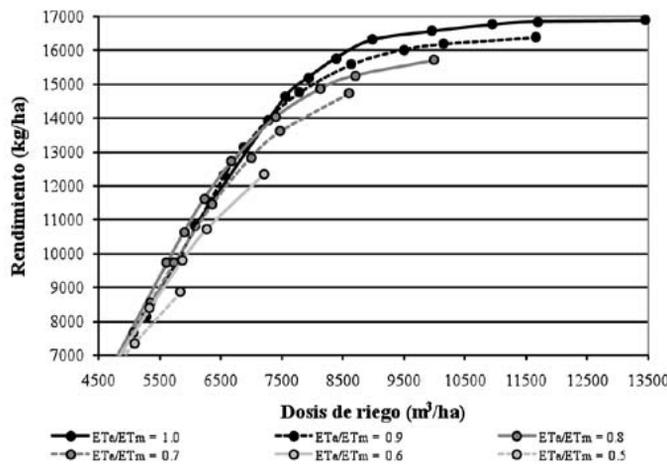
trata de mantener constante el valor medio de la relación  $ETa/ETm$  en toda la parcela.

Como puede verse en la Figura 4, el máximo rendimiento se consigue cuando la casi totalidad de la parcela evapotranspira  $ETm$ , lo que requiere altos valores de "a". No obstante, la eficiencia en el uso del agua disminuye más rápidamente cuanto mayor es el valor de "a" a partir de ciertos valores de agua de riego aplicada (unos 7.000 m<sup>3</sup>/ha en el ejemplo). Por tanto, la combinación entre "a" y la relación media de  $ETa/ETm$  en la parcela puede conseguir resultados muy diferentes para una misma dosis de riego.

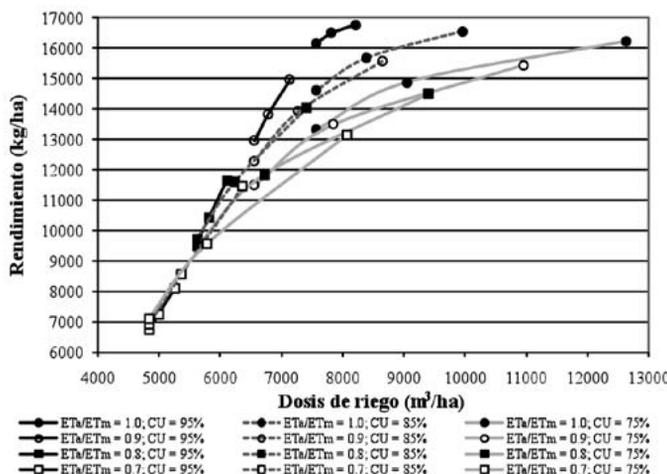
Con el fin de poner de manifiesto la influencia del  $CU$  se ha elaborado la Figura 5. En la misma se comparan los distintos rendimientos esperados en función del valor del  $CU$  del agua en el suelo, para tres valores de área adecuadamente (A) y para cuatro niveles de  $ETa/ETm$ .

Como puede verse en la Figura 5, para una misma relación  $ETa/ETm$ , se consigue mayor rendimiento cuanto mayor es el valor de  $CU$ , con la misma dosis de riego. Estos resultados se han confirmado con los resultados de campo realizados en la zona. El máximo rendimiento se obtendría con  $ETa/ETm = 1$ , pero no compensa-

**Figura 4:** Relación "rendimiento vs. lámina bruta de riego" para distintas relaciones  $eta/etm$ , considerando UN  $CU = 85\%$ , variando el valor del área adecuadamente regada "a", entre 0,5 y 0,99 (lo que corresponde a cada uno de los puntos de cada curva).



**Figura 5:** Relación "rendimiento vs. lámina bruta de riego" para distintas combinaciones de  $ETa/ETm$  y  $CU$ , cuando el valor de "a" toma los valores de 90%, 70% y 50%, (correspondiendo a los tres puntos representados de cada curva).



ría pasar de un valor de “a” de 70% al 90%, por el escaso incremento de rendimiento frente al gran incremento de consumo de agua que supone. Este hecho se ve más acentuado cuanto más bajos son los valores de CU

La Figura 6 muestra los márgenes brutos obtenidos en los 146410 calendarios de riego simulados en la Figura 2, así como la envolvente resultante de aplicar el optimizador del déficit por etapas para un CU del agua en el suelo del 85%.

La Figura 7 muestra las funciones optimizadas que estiman la envolvente superior de las relaciones “margen bruto vs. lámina bruta de riego” para tres valores de CU (95, 85 y 75%). Los resultados ponen de manifiesto la estrategia de riego que maximiza el margen bruto de una explotación, donde puede verse el efecto tan importante que tiene la uniformidad del agua en el suelo sobre el margen bruto del cultivo. De acuerdo con la Figura 6, cuanto mayor es el CU, mayor es el margen bruto obtenido para una determinada dosis de riego aplicada.

Para los datos económicos considerados para el cultivo (Tabla 1), las Figuras 6 y 7 ponen de manifiesto que:

Cuanto mayor es el valor de CU, se logra un mayor margen bruto (MB) para una misma dosis de riego, siendo menor el efecto de CU para bajas dosis de riego.

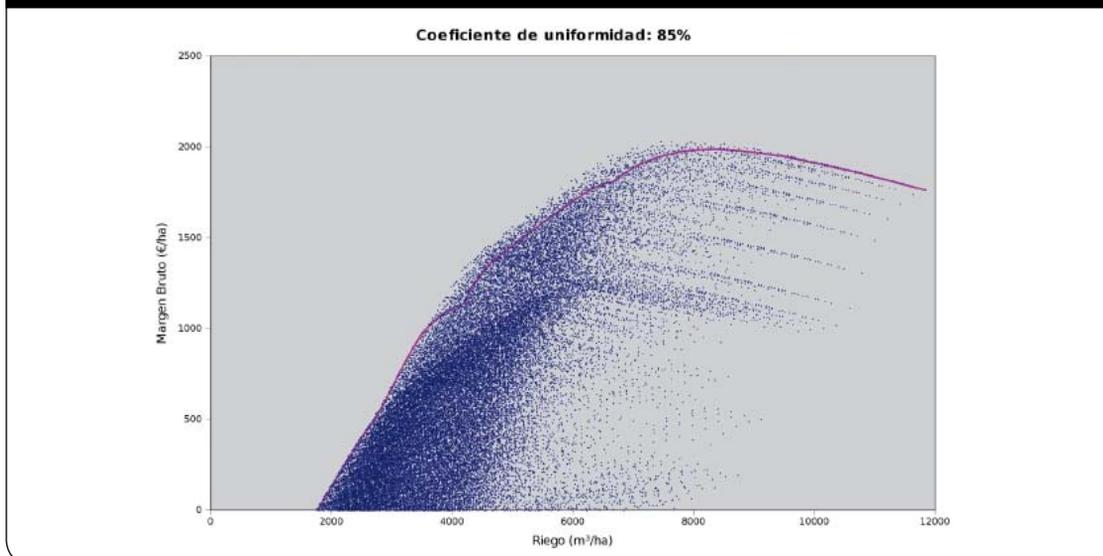
El MB aumenta al hacerlo la dosis de riego aplicada, hasta un máximo, a partir del cual tiende a disminuir, en mayor proporción cuanto menor sea el valor de CU.

El máximo MB se consigue con una relación  $ETA/ETM < 1$  y una proporción del área bien regada (A) inferior al 100%. El valor de “a” que conduce al máximo MB es mayor cuanto menor es la relación  $ETA/ETM$ .

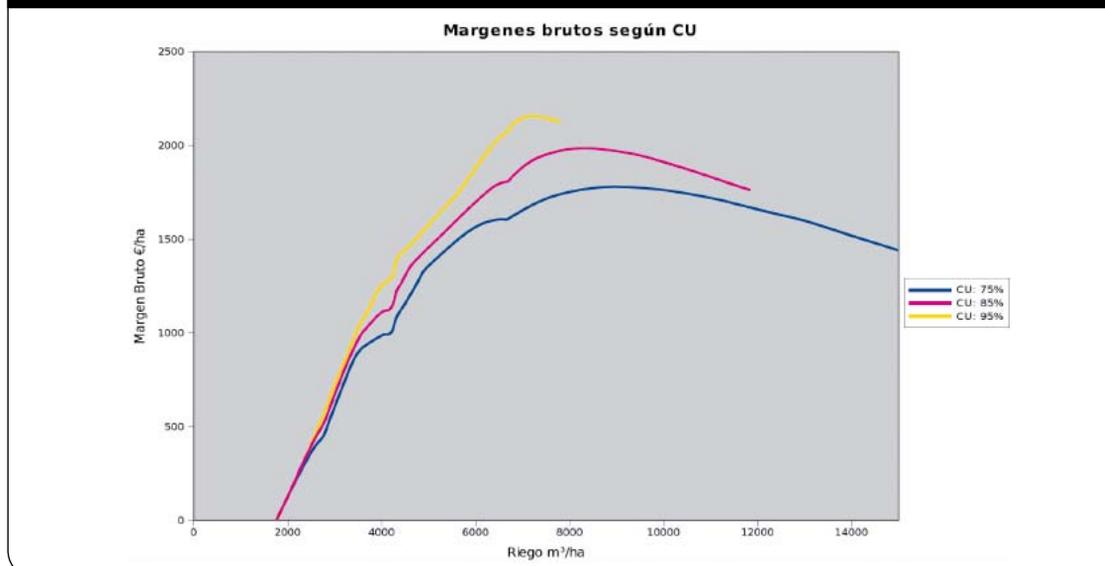
En general, cuanto menor es el valor de “a”, mayor es la pendiente de la curva “margen bruto vs. lámina bruta de riego”, conduciendo a una mayor eficiencia económica en el uso del agua. Valores de “a” comprendidos entre el 50 y el 80% parecen adecuados para valores de  $CU > 80\%$ .

Para ilustrar la importancia de un adecuado calendario de riegos, se ha elaborado la Tabla 2. En ella se han simulado cuatro calendarios de riego diferentes para una situación en la que el agricultor dispone de 650 mm para riego de maíz. Se supone que se trata de un sistema fijo de riego por aspersión, que consigue un  $CU = 85\%$  del agua en el suelo. El periodo de riego del maíz comprende desde mediados de mayo a primeros de septiembre. Las cuatro estrategias de riego a comparar son: Opción 1, baja frecuencia de riegos para tratar de reducir las pérdidas por evaporación y arrastre; Opción 2, alta frecuencia de riegos para tratar de reducir el estrés hídrico del cultivo; Opción 3, calendario óptimo, teniendo en cuenta la diferente respuesta al estrés hídrico

**Figura 6:** Márgenes brutos obtenidos en los 146410 calendarios de riego simulados en la Figura 2 junto con la envolvente resultante de aplicar el optimizador del déficit por etapas para un CU del 85%.



**Figura 7:** Relación “margen bruto vs. lámina bruta de riego” óptima para distintas combinaciones de ETa/ETm y CU.



del cultivo en las diferentes etapas de desarrollo del mismo; Opción 4, calendario de riegos seguido normalmente por los agricultores en la zona, con intervalos entre riegos de 3 días en el periodo punta. Los calendarios 1, 2, y 3 han sido calculados por el modelo, mientras que el 4 ha sido introducido manualmente.

Las Opciones 1 y 2 son las que aplican el menor y el mayor número de riegos, respectivamente. Las Opciones 3 y 4 ofrecen valores intermedios en el número de riegos, aunque más cercanos a la Opción 2. En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos con cada uno de los calendarios de riego anteriores para los principales parámetros de decisión.

**Tabla 2.** Calendario de riegos para las opciones consideradas.

	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Total
ETm (mm)	61,3	110,4	228,7	243,5	78,5	722,4
Lluvia efectiva (mm)	2,1	10,1	5,8	0,0	27,5	45,4
Número de riegos						
Opción 1 (modelo)	1	5	9	7	2	24
Opción 2 (modelo)	2	9	10	10	2	33
Opción 3 (óptimo)	3	7	7	10	2	29
Opción 4 (manual)	2	8	10	10	2	32
Dosis de riego (mm)						
Opción 1 (modelo)	10,5	63,4	266,1	241,8	68,1	650,0
Opción 2 (modelo)	28,3	65,8	288,2	228,1	39,7	650,0
Opción 3 (óptimo)	34,1	65,3	223,9	285,2	42,5	650,0
Opción 4 (manual)	20,0	90,0	250,0	250,0	40,0	650,0

**Tabla 3.** Efecto del calendario de riegos sobre el rendimiento y el margen bruto en un cultivo de maíz.

	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4
ETa/ETm*	0,70	0,90	Variable	Variable
“a” (%)	91	48	-	-
Rendimiento (kg/ha)	11.742	12.132	13.021	11.919
Margen bruto (€/ha)	1.060,3	1.114,2	1.238,6	1.084,8

Nota: \* La relación eta/etm que aparece en la tabla se refiere al valor mínimo que debe alcanzar dicha relación en el área adecuadamente regada “a”.

La Opción 3 (óptima) es la que obtiene los mejores resultados de rendimiento y margen bruto, superando en un 9,2 % al rendimiento y en un 14,2 % al margen bruto del calendario de riegos normalmente seguido por los agricultores de la zona (Opción 4). La diferencia en el número de riegos entre estas dos opciones es de tan solo 3, poniendo de manifiesto la importancia de seleccionar adecuadamente el momento del riego y la dosis a aplicar en el mismo.

---

## 8.6. Conclusiones y recomendaciones

La modelización del efecto de la uniformidad del sistema de riego sobre el rendimiento de los cultivos bajo condiciones de déficit proporciona una mejor aproximación a la realidad del riego en parcela.

La uniformidad del agua de riego afecta notablemente al rendimiento de los cultivos y a la eficiencia en el uso del agua, lo que impli-

ca un efecto importante en el margen bruto obtenido.

El porcentaje de superficie que conviene mantener adecuadamente (A) regado es variable en función de la disponibilidad de agua de riego y del CU del agua en el suelo.

Los resultados ofrecidos por el modelo pueden ser de gran ayuda a la hora de diseñar la estrategia de riego de cualquier zona regable con recursos hídricos limitados.

**Agradecimientos:** este trabajo se ha realizado dentro del marco de los Proyectos Europeos FLOW-AID “Farm Level Optimal Water Management: Assistant for Irrigation under Deficit” N° 036958 (GOCE), y DesURVEY “A Surveillance System for Assessing and Monitoring of Desertification” (SUSTDEV-CT-2004-003950-2), financiados por la U.E.



# 9. Manejo del riego y asesoramiento al regante: riego suplementario y siembra directa

R. Carlesso

Reimar Carlesso: Departamento de Engenharia Rural, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria – Brasil. Contacto: [carlesso@ccr.ufsm.br](mailto:carlesso@ccr.ufsm.br)

## 9.1. Resumo

A evolução da irrigação nos últimos anos introduziu uma série de inovações tecnológicas que possibilitam aos produtores controlar de forma mais adequada e automatizada a aplicação da água. Isto se traduz em um processo mais eficiente, permitindo manejar de forma mais precisa as demandas hídricas das culturas, de forma a possibilitar, assim, aumentos importantes na quantidade e melhorias da qualidade dos produtos explorados. Para irrigar satisfatoriamente o consumo de água das culturas deve ser bem quantificado, pois, regas leves, insuficientes e freqüentes, repõem água apenas na superfície do solo, não umedecendo toda a zona das raízes. Regas excessivas também são prejudiciais, pois acarretam perda de água e de nutrientes, pela percolação abaixo da zona das raízes. Nesse contexto, é fundamental a decisão correta de quando irrigar e quanto de água aplicar em cada irrigação.

A determinação da evapotranspiração de uma cultura ao longo do ciclo de desenvolvimento é fundamental para que se possam estimar as necessidades hídricas da mesma. Como a evapotranspiração de uma cultura é uma função das condições meteorológicas, é razoável inferir que, qualquer alteração nos fatores meteorológicos afeta a transpiração. Dessa forma, é necessário conhecer as condições específicas de um local ou região a fim de estimar o consumo de água pelas plantas em diferentes locais de cultivo.

O uso de sistemas de manejo e monitoramento da irrigação, como o Sistema irriga, permite adequar a gestão da irrigação à demanda climática e tomar em conta a influência de ou-

tros fatores, como o solo, sobre a demanda das culturas. Seguindo os resultados dos modelos é possível encontrar soluções de poupança de água que contribuem também para minimizar os impactos ambientais.

**Palavras-chave:** estação meteorológica, evapotranspiração de referência e manejo de irrigação

## 9.2. Introdução

Nas áreas cultivadas, o suprimento de água às plantas depende da quantidade e distribuição sazonal das precipitações pluviais. Isso significa que o clima é o principal determinante de risco de frustração e oscilação da produção e produtividade das áreas agrícolas. Para irrigar satisfatoriamente o consumo de água das culturas deve ser bem quantificado, pois, regas leves, insuficientes e freqüentes, repõem água apenas na superfície do solo, não umedecendo toda a zona das raízes. Regas excessivas também são prejudiciais, pois acarretam perda de água e de nutrientes, pela percolação abaixo da zona das raízes.

Atualmente, existe um crescente interesse no controle da irrigação através de dados meteorológicos. Dessa forma, a decisão de quando e quanto irrigar está fundamentada na capacidade de armazenamento de água do solo, no tipo e manejo do solo, no estágio de desenvolvimento da plantas e na intensidade da evapotranspiração. Os métodos de estimativa da evapotranspiração das culturas são muitos e de complexa configuração dos dados de entrada, sendo o método de Pennam-Monteith o mais utilizado para estimar a evapotranspiração de referência

(Pereira 2008b). Estações meteorológicas automáticas fornecem todas as informações necessárias para estimar a evapotranspiração e o consumo de água das culturas.

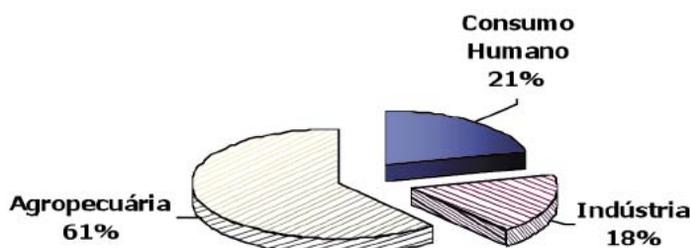
Assumindo a água como recurso/insumo natural, bem público de valor econômico, escasso, finito e vulnerável, a construção de indicadores de eficiência de uso é um procedimento que envolve grande complexidade (Pereira 2008a). Esses indicadores necessariamente devem passar pelo crivo de uma análise baseada nos fundamentos da teoria econômica e social aplicadas especificamente à questão hídrica. Além disso, deve-se proceder uma análise de eficiência técnica através de indicadores físicos e ambientais capazes de aferir a maximização de resposta otimizada quando do uso da água para demandas específicas.

É necessário reconhecer a possibilidade de ocorrência de impactos negativos do uso da irrigação, avaliando-os e desenvolvendo soluções tecnológicas que promovam melhorias, viabilizando a atividade agrícola irrigada, de forma adequada. A compatibilização do uso correto dos recursos naturais, visando a respectiva sustentabilidade, com os benefícios gerados pela atividade irrigada, será capaz de produzir os efeitos positivos, resultantes da adoção da técnica. A evolução da irrigação nos últimos anos introduziu uma série de inovações tecnológicas que possibilitam aos equipamentos controlar de forma mais adequada e automatizada a aplicação da água. Isto se traduz em um processo mais eficiente, permitindo manejar de forma mais precisa as demandas hídricas das culturas. Os sistemas de irrigação elevam os rendimentos, reduzindo ao mínimo as perdas e promovendo a integração da irrigação com outras operações simultâneas, como a adubação, o controle de pragas e doenças.

Aproximadamente 15% das áreas utilizadas na agricultura são irrigadas. No entanto, a agricultura irrigada contribui com aproximadamente metade do valor da produção mundial de alimentos. Em 1995, a área irrigada no mundo era de 254 milhões de hectares, com expectativa de aumento de 30% até 2025. No entanto, a porcentagem de consumo de água utilizada na agricultura deverá diminuir, em razão do aumento na demanda dos recursos hídricos pelo setor produtivo industrial, e outras demandas de usos múltiplos públicos. Em escala mundial, a demanda hídrica anual está estimada em 14 mil km<sup>3</sup>, sendo que a oferta só atende cerca de 66% desse total. Mantendo-se as taxas de consumo e considerando-se um crescimento populacional anual de 1,6%, o esgotamento das potencialidades de estoque recursos hídricos está previsto para ocorrer no ano de 2053.

Na América Latina, o setor agrícola é o maior usuário consuntivo de água, demandando cerca de 2/3 de toda a água caputada de rios, lagos e aquíferos subterrâneos. Na Figura 1 está apresentada a distribuição média de consumo de água no Brasil salientando a participação da irrigação como maior usuário dos recursos hídricos. Os outros 31% são consumidos pelas indústrias e uso doméstico. Em que pese o consumo, a agricultura irrigada é a forma mais eficiente e segura de aumentar a produção de alimentos, pois permite o incremento na produtividade, principalmente, em ambientes semi-áridos e áridos. A irrigação é um recurso tecnológico de fundamental importância para prover a produção de alimentos e fibras em escala suficiente para uma população mundial que cresce continuamente (Howell, 2000). No Brasil aproximadamente 5% da área cultivada é irrigada, correspondendo a 16% do total da produção e de 35% do valor econômico dessa produção (Paz et al., 2000).

**Figura 1:** Participação dos diferentes usuários na utilização dos recursos hídricos no Brasil.



A incorporação e expansão das áreas irrigadas está associada a necessidade de aumentar os níveis de produtividade, uma vez que a expansão horizontal da agricultura está praticamente esgotada. A irrigação é uma tecnologia que permite agregar valor ao produto colhido (quando adequadamente conduzida), proporcionando maior rentabilidade ao produtor. No Brasil, o interesse pela adoção da irrigação emerge nas mais variadas condições de clima, solo e situação sócio-econômica do produtor.

### **9.3. Aspectos tecnológicos envolvidos no manejo da irrigação**

Na agricultura não-irrigada os impactos da deficiência hídrica podem ser parcialmente minimizados através do planejamento da atividade agrícola, orientado as épocas de semeadura de acordo com o regime pluviométrico de cada região, além da utilização de variedades tolerantes e/ou resistentes a curtos períodos de deficiência de água no solo.

Para obterem-se resultados satisfatórios com a irrigação, o consumo de água das culturas deve ser bem quantificado, pois regas leves, insuficientes e freqüentes, repõem água apenas na superfície do solo, não umedecendo toda a zona das raízes. Por isso, elas tornam-se superficiais e incapazes de explorar o volume de solo disponível. Regas excessivas também são prejudiciais, pois acarretam perda de água e de nutrientes, pela percolação abaixo da zona das raízes.

A freqüência de irrigações requerida pelas culturas é regulada fundamentalmente pela capacidade de armazenamento de água no perfil do solo e das necessidades hídricas das culturas. Nas últimas décadas, ocorreram mudanças fundamentais nos conceitos que envolvem as relações solo-água-planta-atmosfera. Na avaliação da disponibilidade de água às plantas deve-se quantificar os fatores edáficos, climáticos e fisiológicos das plantas (Petry, 2000; Carlesso & Zimmermann, 2000). Constantes hídricas do solo como a capacidade de campo, ponto de murcha permanente, água capilar, água gravitacional, etc., utilizadas para definir o armazenamento de água no solo não indicam plenamente a disponibilidade de água no solo para as plantas. Essas variáveis estão baseadas na suposição de que o conteúdo de água no solo é unicamente dependente do potencial matricial. Porém, são

de extrema utilidade no cálculo e modelação do balanço hídrico do solo (Pereira et al., 1995; Pereira, 2004).

O armazenamento de água pelo solo e sua disponibilidade às plantas dependem de processos dinâmicos, tais como: infiltração, redistribuição interna, drenagem e absorção pelas raízes das plantas (Jong van Lier, 2000). A quantidade de água extraída pelas plantas, depende da habilidade das raízes em explorar um volume considerável do solo e absorver a água do mesmo, bem como da habilidade do solo em armazenar e manter um fluxo adequado de água em direção às raízes em taxas suficientes para suprir a demanda evaporativa da atmosfera (Hillel, 1980; Ahuja & Nielsen, 1990). Qualquer alteração em um desses componentes irá afetar o fluxo de água na relação hidrodinâmica de trocas no sistema solo-planta-atmosfera.

Os principais fatores que afetam a disponibilidade de água no solo são causados: pela planta (distribuição do sistema radicular, índice de área foliar, altura de plantas, etc.), pelo solo (profundidade explorável pelas raízes, drenagem e infiltração, fertilidade natural; salinidade (também da água), compactação e distribuição dos poros); pelo clima (demanda evaporativa da atmosfera) e pelo manejo da irrigação. Quando esses fatores são parcial ou totalmente controlados, regulados ou adequadamente manejados a eficiência do uso da água aumenta.

Os métodos mais utilizados para a determinação do momento de acionar o sistema de irrigação em uma determinada área podem ser baseados em características da planta, do solo ou do clima (Carlesso & Zimmermann, 2000; Pereira, 2004;). A planta apresenta alguns sintomas característicos quando submetida a situações de disponibilidade hídrica inferiores às ideais (enrolamento, menor alongação das folhas e entrenós, mudança na pigmentação das folhas, epinastia, ângulo de inserção das folhas, etc). No entanto, quando a planta exterioriza a maioria dessas características o efeito da deficiência da água no solo já causou uma redução significativa no potencial produtivo da cultura (Santos & Carlesso, 1999).

A determinação da freqüência da irrigação através de características do solo tem sido mais freqüentemente utilizada. Dentre essas características destacam-se conteúdo de água no solo, o

potencial matricial da água no solo e a disponibilidade de água às plantas (vd. Garcia, 2008). A determinação freqüente e continuada do conteúdo de água no solo é preciso, embora trabalhoso, pois se baseia na lâmina de água consumida pela cultura. Por exigir mão-de-obra especializada, ele não tem sido muito utilizado no manejo de áreas irrigadas e sim em experimentos de irrigação.

O monitoramento do potencial matricial da água no solo através de tensiômetros tem sido utilizado em áreas irrigadas. Os tensiômetros fornecem dados sobre o potencial de água nas camadas monitoradas e através da curva característica da água no solo se obtém o conteúdo de água no solo, para fins de determinação da quantidade de irrigação (lâmina a ser aplicada). A determinação da freqüência de irrigação e lâminas a serem aplicadas com base nas características do solo tem sido pouco utilizada no Brasil, pois esses métodos exigem, de maneira geral, elevada mão-de-obra. Adicionalmente, o custo dos equipamentos disponíveis para leitura direta do conteúdo de água no solo é elevado e dificilmente são utilizados para o monitoramento de áreas irrigadas, mesmo em países desenvolvidos.

Atualmente, existe um crescente interesse no controle da irrigação através de dados meteorológicos, uma vez que esses são os principais responsáveis pelas oscilações de safras agrícolas no Brasil. Dessa forma, a decisão de quando e quanto irrigar está fundamentada na capacidade de armazenamento de água do solo, no tipo e manejo do solo, no estágio de desenvolvimento da plantas e na intensidade das perdas de água pelo processo da evapotranspiração.

### **Determinação da evapotranspiração das culturas**

A determinação da evapotranspiração de uma cultura ao longo do ciclo de desenvolvimento é fundamental para que se possam estimar as necessidades hídricas da mesma. Como a evapotranspiração de uma cultura é uma função das condições meteorológicas, é razoável inferir que qualquer alteração nos fatores meteorológicos afeta a transpiração. Dessa forma, é necessário conhecer as condições específicas de um local ou região a fim de estimar o consumo de água pelas plantas em diferentes locais de cultivo.

Nos últimos 50 anos grande quantidade de experimentos foi conduzido para estimar a evapotranspiração dos cultivos, principalmente para o entendimento dos processos físicos e químicos que determinam a taxa de evaporação. Um significativo avanço foi observado no procedimento de medida e de modelos matemáticos de estimativa. Entretanto, existem hoje dezenas de métodos e/ou procedimentos para estimar a evapotranspiração e vários autores tem publicado extensas revisões sobre o assunto como Penman et al. (1967), Doorenbos & Pruitt (1977), Villa Nova & Reichardt (1989) e Pereira et al. (1997). Alguns desses métodos apresentam precisão adequada para estimar a evapotranspiração em escala horária, diária, mensal, etc., considerando situações conhecidas. A medida direta da evapotranspiração é extremamente difícil e onerosa. Difícil porque exige instalações e equipamentos especiais; e onerosa porque tais estruturas são de alto custo, justificando-se apenas em condições experimentais. Assim, a evapotranspiração é normalmente estimada.

A relação solo-água-planta-atmosfera (responsável pelo fluxo de água no interior da planta e dessa para a atmosfera) é governada por trocas de massa e energia e é regulada principalmente pelo fator biológico. O principal controle é realizado pela abertura estomática que, obviamente, depende de fatores climáticos.

Tanques evaporimétricos (TCA) ainda são utilizados, embora a tendência natural seja de substituir essas medidas diretas por determinações a partir de dados meteorológicos. Essas determinações poderão ser baseadas em equações empíricas ou em equações físicas: o método de Hargreaves (uma equação empírica) está fundamentado principalmente em valores de temperatura do ar.

Para a utilização dos métodos físicos de estimativa da evapotranspiração várias conferências e seminários foram realizados, especialmente os organizados pela FAO ou pela ICID, para substituir a equação de Penman (FAO-24) pela equação de Penman-Monteith, tendo como principal argumento a superestimativa da evapotranspiração de referência de uma área gramada. Resultou que vem sendo adotada uma nova metodologia padronizada proposta pela FAO (Allen et al., 1998, 2006; 2007).

Os coeficientes de cultivo são largamente utilizados, desde a publicação do boletim da FAO-24 (Doorenbos & Kassan, 1977), para a estimativa da evapotranspiração máxima de uma cultura (condição de irrigação) através de uma combinação entre o valor da evapotranspiração de referência com um adequado coeficiente de cultivo (Pereira, 2008b). Nas últimas décadas vários estudos foram publicados sobre o uso dos coeficientes de cultivos para as diferentes fases de praticamente todas as espécies comercialmente cultivadas (Allen et al., 2007). No entanto, um problema recorrente, que requer investigação mais detalhada, é quando a evapotranspiração de referência estimada pelo método Penman-FAO for transformada para o método Penman-Monteith, nesse caso os coeficientes devem ser corrigidos. Nos últimos anos o Boletim FAO-56 (Allen et al., 1998, 2006) tem sido utilizado com mais frequência pelos profissionais envolvidos com a irrigação.

Em resumo, os métodos de estimativa são muitos e de complexa configuração dos dados de entrada, sendo o método de Penman-Monteith um dos mais utilizados para estimar a evapotranspiração de referência. Estações meteorológicas automáticas fornecem todas as informações necessárias para estimar a evapotranspiração e o consumo de água das culturas. Pode-se, também, estimar a evapotranspiração através de tanques evaporimétricos. Entretanto, essa determinação é usualmente de baixa precisão e as medidas ocasionam estimativas acumuladas da evapotranspiração muitas vezes irrealis.

Para o manejo racional da irrigação o dimensionamento do sistema de irrigação deve ser elaborado com o conhecimento prévio das seguintes variáveis: (I) caracterização física do solo com avaliação da capacidade de infiltração, densidade do solo, limites superior e inferior de disponibilidade de água (geralmente estimados pela capacidade de campo e ponto de murcha permanente, respectivamente), fertilidade, textura, profundidade do solo, drenagem, profundidade do nível freático, etc.; (II) caracterização da planta através de dados sobre a variedade, profundidade do sistema radicular, fenologia, coeficientes de cultivo, suscetibilidade a déficits hídricos, índice de área foliar, períodos críticos, produtividade, porte, etc. e; (III) condições climáticas do local com dados de precipitação plu-

vial, temperatura, radiação solar, vento, umidade relativa do ar, etc.

Pelo exposto, é aceitável afirmar que o manejo de irrigação não é uniforme ao longo do ciclo de crescimento e desenvolvimento das plantas. No entanto, a determinação correta e calibrada do intervalo entre duas irrigações sucessivas e da lâmina de água a ser aplicada na mesma área é essencial para o sucesso da irrigação. Desta forma, a flexibilidade do manejo de irrigação será realizada para propiciar um adequado suprimento de água de modo que o crescimento e o desenvolvimento das plantas não sejam afetados por déficits hídricos ou por eventuais excessos causados por irrigações desnecessárias. Estas, além do mais, provocam impactos ambientais negativos: demanda excessiva de recursos hídricos, transporte de fertilizantes e agro-químicos para águas subterrâneas e superficiais, salinização de solos, etc.

### **Manejo de irrigação**

Um dos problemas clássicos que envolvem o manejo da irrigação é a determinação de quando e quanto irrigar. Atualmente, existe um crescente interesse no controle da irrigação através de variáveis meteorológicas, visto que estas são as principais responsáveis pelas oscilações no rendimento das safras agrícolas no Brasil. O manejo da irrigação a partir de dados meteorológicos implica que estes sejam representativos de uma propriedade ou região e que sejam coletados automaticamente. Embora o avanço da tecnologia na agricultura tenha possibilitado rapidez e facilidade no acesso a um grande contingente de dados, a coleta e disponibilização dos dados deve ser realizada com precisão. Isso significa que o planejamento, instalação, manutenção e a procedência dos dados coletados automaticamente devem ser feitos por pessoas tecnicamente capacitadas.

A estrutura de informações meteorológicas no Brasil é organizada em Distritos Meteorológicos, que recebem informações de diversas estações meteorológicas instaladas nas diferentes regiões agroclimáticas. No entanto, as informações meteorológicas coletadas nessas estações oficiais não são disponibilizadas aos interessados na velocidade necessária. As estações meteorológicas oficiais na sua grande maioria não são automáticas e quando os dados estão disponíveis em

meio digital os mesmos não são disponibilizados para uso privado, dificultando enormemente a obtenção das informações meteorológicas. Isto mesmo sucede em muitos países, nomeadamente na Europa. A situação considerada ideal seria o produtor ter ao seu dispor informações climáticas da sua propriedade que, juntamente com as informações de um distrito meteorológico, auxiliassem no processo de planejamento, instalação e condução das lavouras.

O avanço dos instrumentos eletrônicos para obtenção de dados meteorológicos, vem desenvolvendo-se rapidamente, sobretudo o uso de estações meteorológicas automáticas. Os dados fornecidos por essas estações, juntamente com os obtidos em observatórios oficiais, permitem a avaliação e o planejamento das atividades agrícolas.

Uma rede é formada pela interligação de estações meteorológicas, com comunicação via satélite, rádio, telefonia ou micro ondas, onde existe um ponto de coleta de informações. Essa interligação permite a visualização, em tempo real, de dados meteorológicos de uma microrregião, auxiliando na tomada de decisão de um grupo de produtores. Facilita enormemente o monitoramento de condições favoráveis ao aparecimento de uma determinada praga ou moléstia, ou determinação de períodos propícios a formação de geadas e, principalmente, para indicar o momento de acionar os sistema de irrigação e a indicação da quantidade de água a ser aplicada.

No Brasil, a utilização das estações meteorológicas automáticas é recente, sendo que um grande número está instalada em instituições de pesquisa. Porém, o seu uso por produtores rurais vem crescendo continuamente. O Departamento de Engenharia Rural, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), implementou uma rede de estações meteorológicas automáticas para proporcionar aos irrigantes acesso as informações de quando irrigar as suas áreas e quanta água aplicar em cada irrigação, através do Sistema Irriga.

O Sistema Irriga é um sistema de manejo e monitoramento de irrigação criado e desenvolvido pela UFSM, tendo como principal objetivo disponibilizar um sistema de manejo de irrigação prático, funcional e facilmente aplicável no campo, e que permitisse maximizar a eficiência do uso da água em áreas irrigadas para as cul-

turas do milho, soja, trigo, cevada, batata, café, feijão, algodão, tomate, ervilha, girassol, arroz, brachiária, sorgo, cebola, milheto, maçã, pêra, pêssego e videira.

Iniciado em nível de produtor rural em 1999, o sistema atualmente possui 135 estações meteorológicas automáticas com sistema em tempo real de transmissão de dados (Plataformas de coletas de dados - PCD) instaladas, sendo a maior rede privada de estações meteorológicas (PCDs) existente no Brasil. Cada PCD está constituída de uma estação meteorológica automática que transmite dados meteorológicos em tempo real, via satélite, para a central do Sistema Irriga. Esses dados juntamente com as informações de solo (características físicas) de cada área irrigada, cultura (índice de área foliar, altura de plantas, sistema radicular, etc.) e do equipamento de irrigação (sistema, método, lâmina mínima, lâmina diária, coeficiente de uniformidade, etc.) são processados diariamente para fornecer, individualmente para cada área irrigada do produtor, a necessidade de aplicar ou não uma irrigação. As recomendações de irrigação são disponibilizadas em tempo real, via Internet, para cada pivô ou parte dele e com previsão da irrigação com 24 e 48 horas de antecedência.

O produtor deve somente informar a cultura semeada, a variedade e/ou híbrido, data de semeadura, sistema de cultivo, espaçamento entre linhas e população de plantas. Todas as informações necessárias a operação do sistema são coletadas por pessoal técnico especializado que visita sistematicamente todas as áreas irrigadas em intervalos inferiores a 2-3 semanas. Essas visitas são pré-agendadas com data e horário da chegada do técnico nas propriedades (áreas irrigadas) em todas as regiões monitoradas.

Além dos benefícios já demonstrados, o Sistema Irriga traz para o usuário: (i) possibilidades de aumento na produtividade; (ii) economia de água/energia; (iii) adequação de mão-de-obra; (iv) equilíbrio com o meio ambiente: é um sistema de monitoramento da irrigação que se baseia na exigência hídrica da cultura em suas respectivas fases de desenvolvimento e; (v) possibilidades de redução do uso de defensivos agrícolas: com o manejo adequado da água, evitam-se ambientes excessivamente úmidos, favoráveis ao aparecimento e desenvolvimento de doenças.

Com a junção dos dados meteorológicos coletados de uma determinada região, com informações do solo, planta e equipamento de irrigação, é possível fazer a recomendação de quando irrigar e quanta água aplicar. Essa recomendação é disponibilizada aos usuários por telefone ou através do portal do Sistema Irriga® - [www.sistemairriga.com.br](http://www.sistemairriga.com.br).

### Armazenamento e validação dos dados meteorológicos

A confiabilidade da ETO estimada depende da qualidade dos dados meteorológicos utilizados no cálculo. A qualidade conferida aos dados inicia-se na determinação do intervalo de medidas das variáveis meteorológicas pelos sensores. É importante que esse intervalo assegure adequadamente as alterações meteorológicas que ocorreram entre medidas consecutivas. Por isso, é necessário que seja estabelecida uma rotina de inspeção e/ou verificação automática dos dados enviados pelas PCD's que formam a rede de estações, além das rotineiras verificações visuais.

Na tabela 1 é apresentada a resolução, acurácia e unidades de medida das variáveis meteorológicas coletadas pelas PCD's, de acordo com as normas recomendadas pela OMM.

Ao receber os dados das estações, o servidor automaticamente roda um filtro para verificar se os mesmos estão dentro da faixa estipulada pela Tabela 1. Caso existam dados inconsistentes, os mesmos serão armazenados, porém não serão utilizados nos cálculos.

A manutenção e calibração do conjunto de sensores das PCD's é um processo rotineiro e delas depende a confiabilidade dos dados medidos em

determinado local. A calibração dos sensores é feita por empresas de Assistência Técnica específica para este fim. Os testes de calibração dos sensores são feitos a cada dois (2) anos e constam de reconfiguração de sensores (no caso da reposição de sensores), testes de comunicação, entrada de novas constantes de calibração, etc. As operações de manutenção e calibração são feitas com as PCD's operando em modo off-line.

### Parâmetros de solo

O conhecimento das características físico-hídricas dos solos é fundamental para a viabilização de um sistema de manejo de irrigação. O armazenamento de água no solo e sua disponibilidade às plantas, a infiltração e/ou escoamento da água, bem como a estrutura e textura do solo são parâmetros indispensáveis na determinação da lâmina e frequência de irrigação. Em função disso, em todas as áreas monitoradas pelo Sistema Irriga® é feita a amostragem de solo para a caracterização físico-hídrica desses. Para a coleta das amostras trincheiras são cavadas com aproximadamente 80cm de comprimento, 60cm de largura e 75cm de profundidade. Os perfis dos solos são divididos em três camadas, em função da morfologia do solo, assim descritas: camada superficial, camada intermediária e camada inferior. A camada superficial usualmente varia de 0 a 25cm de profundidade entre os perfis amostrados, a camada intermediária varia de 15 a 50cm e a camada inferior varia de 35 a 75cm de profundidade. As amostragens são normalmente realizadas no último, penúltimo e antepenúltimo lance dos pivôs, pois esses locais representam a maior área irrigada por lance do pivô. Cada amostragem (trincheira) é representativa de uma área aproximada de 50 hectares

**Tabela 1.** Faixa específica de medidas, acurácia e unidades de medidas utilizadas em PCD's que formam a rede de estações meteorológicas do Sistema Irriga®.

Sensor	Resolução	Acurácia	Unidade
Pressão atmosférica	750 a 1060	0.3	hPa
Temperatura do ar	-25 a +60	0.3	°C
Umidade relativa	2 a 100	3	%
Velocidade do vento	1,03 a 92,6	2	m/s
Direção do vento	0 a 359	5	Graus
Precipitação pluvial	0 a 999.8	2%	Mm
Radiação solar	0 a 1500	5	W m-2

de área irrigada Nos pivôs que apresentavam desuniformidade em relação às características morfológicas do solo, realiza-se uma amostragem em cada local que apresentava diferença de textura do solo, independentemente da seqüência de lances do pivô.

Amostras com estrutura preservada são coletadas com o auxílio de um extrator, para a determinação da macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade do solo e curva característica de água no solo (-0,006, -0,01, -0,033, -0,1, -0,5 e -1,5 MPa), segundo a metodologia proposta por Embrapa (1997). Amostras com estrutura não preservada são também coletadas para a análise granulométrica (Gee & Bauder, 1986) e densidade de partículas (Embrapa, 1997).

### **Parâmetros da cultura irrigada**

As características das plantas, como área foliar, altura de plantas, distribuição e profundidade do sistema radicular, população e espaçamento de plantas, arquitetura do dossel das plantas e estágio de desenvolvimento são parâmetros que influenciam a evapotranspiração e o consumo de água. Para a obtenção dessas informações são realizados experimentos de campo com diversas culturas e diferentes materiais. Atualmente, o banco de dados do Sistema Irriga® conta com informações validadas de índice de área foliar, altura de plantas, distribuição do sistema radicular, soma térmica e fotoperíodo nos principais estádios de desenvolvimento das seguintes culturas: abóbora, alfafa, alho, arroz, algodão, batata, brachiária, cebola, cenoura, cevada, café, ervilha, feijão, girassol, maçã, milho, milho doce, milho pipoca, milheto, pêssego, pêra, soja, sorgo, tabaco, tomate, trigo e videira.

### **Parâmetros de equipamento**

As informações técnicas do sistema de irrigação - lâmina mínima e máxima de irrigação, uniformidade de distribuição da água e eficiência de irrigação - são utilizadas para determinar a freqüência e a lâmina de irrigação. Essas informações são disponibilizadas pelo usuário do Sistema Irriga, a partir dos laudos técnicos do fabricante do equipamento. A recomendação

diária de irrigação parte do pressuposto que os equipamentos estejam operando adequadamente. Entretanto, o Sistema Irriga® recomenda que os sistemas de irrigação sejam aferidos por empresas técnicas especializadas, segundo normas da ABNT, em intervalos de no máximo de dois a três anos. Na Figura 2 está apresentado um esquema simplificado do funcionamento do sistema, com os quatro fatores considerados em cada recomendação e as maneiras como os usuários podem receber as recomendações de manejo de irrigação.

### **Monitoramento da irrigação**

O monitoramento das irrigações inicia-se com a semeadura e/ou plantio das culturas. A partir desse momento, visitas técnicas são agendadas por profissionais devidamente treinados para o acompanhamento de todas as áreas monitoradas pelo Sistema Irriga®. Nessas visitas os técnicos do Sistema determinam a umidade do solo (a partir de sensores TDR instalados, em no mínimo três profundidades do perfil do solo, em locais previamente identificados e representativos da área irrigada para aferição dos parâmetros utilizados na plataforma do Sistema), o estágio fenológico médio da cultura, profundidade do sistema radicular das plantas, altura de plantas, índice de área foliar, população de plantas, além de observar os aspectos fitossanitários da cultura, presença de plantas invasoras e condições nutricionais das plantas, fatores que interferem diretamente no manejo da irrigação. Não compete aos técnicos do sistema avaliar ou orientar aspectos de manejo da cultura que não seja a irrigação. Os técnicos do Sistema Irriga® não têm responsabilidade pelo produto ou dose de uma determinada aplicação que está sendo ou será aplicada para o controle de uma praga, doença ou planta invasora.

As visitas às propriedades são agendadas antecipadamente, no mínimo com uma semana de antecedência, e estão disponíveis aos produtores na página do Sistema Irriga® na opção "Calendário de visitas" (Figura 3). Nesse campo aparece a data e o horário da visita bem como os nomes dos integrantes da equipe que irão fazer a visita. Dessa maneira, o produtor irrigante tem condições de planejar o acompanhamento da visita ou designar alguém da sua equipe para acompanhar os técnicos do sistema. Além de es-

**Figura 2:** Esquema simplificado do funcionamento do Sistema Irriga



**Figura 3:** Imagem da interface do Sistema Irriga® diariamente disponibilizada aos usuários irrigantes, com a indicação de quando e quanto irrigar, para cada um dos sistemas de irrigação cadastrados.

**Sistema Irriga®** Versão 3.50

» Manejo de Irrigação

- Calendário de visitas
- Sistemas cadastrados
- Quando irrigar
- Cadastrar chuvas / irrig. extras
- Quanto irrigar
- Controle de suas irrigações
- Relatório de resultados

» Voltar

Usuário: Grupo Orlando

Terça-feira, 26/06/2007

» Quando irrigar

✓ Posicione a seta do mouse sobre a célula com irrigação (em azul), para que o valor de relé ou tempo seja exibido.

■ Irrigação ■ Sem irrigação ■ 60% probab. ■ 95% probab.

Sistema	Cultura	Irrigação	Data					
			23/06	24/06	25/06	26/06	27/06	28/06
Pivô 01	Milho	Antecipar		14,00				
Pivô 05	Milho	Antecipar		12,00				
Pivô 08 A	Tomate	-			14,76			
Pivô 08 B	Tomate	Ajdar				17,00		
Pivô 08 C	Tomate	Antecipar						

clarecer qualquer tipo de dúvida sobre as irrigações anteriormente recomendadas pelo sistema.

Durante cada visita é preenchido um relatório contendo informações técnicas da cultura, solo e equipamento de irrigação. Após o encerramento do monitoramento da irrigação de uma

determinada área é disponibilizado ao produtor um relatório contendo informações sobre a duração do ciclo, total de chuva, número de dias com chuva, total de irrigações recomendadas, lâmina total recomendada, número de dias com irrigação, número de visitas, além de fotografias tomadas em cada visita e dos relatórios parciais.

## 9.4. Aspectos relacionados ao sistema produtivo

A irrigação é um dos principais instrumentos para manter o agricultor no campo e possibilitar seu desenvolvimento econômico e social (Hargreaves, 2000). Pode-se até inferir que a irrigação transformou o uso e a exploração das terras e a sociedade humana como nenhuma outra atividade havia feito anteriormente. Não obstante, registros históricos reportam que muitas civilizações da antiguidade, cuja atividade agrícola esteve baseada na agricultura irrigada, ruíram em função do uso inadequado da água, sem considerar conceitos e indicadores de uso, produtividade da água e capacidade de suporte dos mananciais.

Com uma aplicação adequada da água de irrigação, os agricultores irrigantes podem aumentar a produtividade das explorações, além de possibilitar safras adicionais. Para isto, é necessário que a pesquisa desenvolva, valide e disponibilize opções de manejo apropriado para a agricultura irrigada que possam contribuir para a conservação dos recursos naturais e garantir um desenvolvimento sustentável. Nesse sentido, é função da pesquisa oferecer dados sobre o manejo de culturas visando aumentar a produção, diminuindo os riscos da atividade agrícola.

Dessa forma, pode-se inferir que a agricultura irrigada é um componente vital para aumentar a quantidade e a qualidade de alimentos e fibras produzidas para o consumo humano. Notadamente, o avanço nas áreas irrigadas tem contribuído enormemente nas discussões acerca da melhor eficiência no uso da água, tanto sob o ponto de vista agrônomico e da engenharia, como preservação e conservação da água, invocando os conceitos de produtividade da água e poupança de água. E, a melhor contribuição da irrigação na eficiência do uso da água é o aumento da produção por unidade de volume de água consumida, além de redirecionar a água para a sua maior prioridade, ou seja, o incremento da produção de alimentos.

O principal aspecto do manejo adequado da irrigação está relacionado à eficiência de uso da água. Do ponto de vista biológico, a eficiência de uso da água (EUA) é a razão entre a produção de massa seca por unidade de água consumida, onde o genótipo da planta e a disponibilidade

de de radiação solar são fatores fundamentais para maximizar esta relação. Por isso, quando as necessidades hídricas das culturas são suplementadas via irrigação, a discussão acerca da ineficiência ou baixa eficiência do uso da água deve envolver, necessariamente, aspectos agrônomicos e de engenharia, além dos aspectos ambientais.

O clima predominante nas regiões de terras secas do Brasil se caracteriza pela irregularidade sazonal do regime de precipitações pluviárias (entrada de água no ambiente semi-árido) e elevado índice de evaporação (saída de água do ambiente semi-árido) resultando num balanço hídrico deficitário, implicando em escassez severa de recursos hídricos, com todas as consequências sociais e ambientais. Em síntese, a problemática da escassez de água no semi-árido brasileiro, advém da irregularidade do regime de precipitações associado ao elevado índice de evaporação.

A escassa disponibilidade de estoques de água doce para garantir o atendimento das múltiplas demandas sociais e ecológicas é condição natural em ambientes de domínio de climas semi-áridos e/ou áridos. O planejamento estratégico para aumentar a eficiência dos procedimentos e processos de captação, estocagem, distribuição e uso da água em áreas afetadas por escassez, vem sendo pensado, desenvolvido e validado para as terras secas do Brasil e em vários outros países.

Indicadores de ineficiência de uso ou do uso perdulário da água, em todos os setores de usuários, são mais visíveis e conhecidos que indicadores de eficiência de uso. Estima-se para o Brasil um índice médio de 40% de perdas de volumes de água disponível na cadeia processual de captação, estocagem, alocação e uso dos recursos hídricos. O uso perdulário se traduz em custos para a sociedade e pressão de demanda sobre o recurso escasso, sem usufruto ou benefício social, sendo importante fator a ser gerador de escassez. Considerando o significativo e elevado volume de perdas, as tecnologias, técnicas e estratégias de gestão apropriadas ao uso eficiente da água disponível poderão ser contabilizadas como cota de poupança de água muito importante, com grandes repercussões positivas nas dimensões socioeconômicas e ambientais.

A proteção da qualidade da água, também deve ser considerada como fundamental estratégia

de eficiência no uso, pois além de ser um fator de disponibilidade hídrica é indicador de adequada gestão ambiental. A identificação, o desenvolvimento e a validação de tecnologias inovadoras de baixo custo, o aperfeiçoamento de tecnologias nativas e a estruturação de um processo de tomada de decisões baseado em indicadores de eficiência do uso da água são necessários para o aproveitamento pleno dos recursos hídricos limitados e protegê-los da poluição.

A estratégia de gestão dos recursos hídricos nas terras secas deve prever: a otimização da alocação de volumes de água considerando as condições de limitações físicas e socioeconômicas; programar as decisões de alocação pela gestão das demandas e repercussões socioeconômicas e ambientais, regulação por mecanismos de cobrança induzindo a poupança de água e considerar custos de oportunidade que reflitam o uso alternativo mais valioso do recurso escasso, enquanto bem social, econômico e serviço ambiental.

Assumindo a água como recurso/insumo natural, bem público de valor econômico, escasso, finito e vulnerável, a construção de indicadores de eficiência de uso é um procedimento que envolve extrema complexidade. Esses indicadores necessariamente devem passar pelo crivo de uma análise lastreada nos fundamentos da teoria econômica e social aplicadas especificamente à questão hídrica. Além disso, deve-se proceder a uma análise de eficiência técnica através de indicadores físicos e ambientais capazes de aferir a maximização de resposta otimizada quando do uso da água para demandas específicas. Assim, o indicador de eficiência de uso deve resultar de uma função de solução integrada e multicritério. Garrido (2003), trata em profundidade a questão da otimização do uso da água, discorrendo sobre funções de demanda por água enquanto insumo de produção.

### **Sistemas de cultivo do solo em áreas irrigadas por aspersão no Sul do Brasil**

As lavouras irrigadas caracterizam-se pela intensificação dos cultivos, e por consequência, uma intensa utilização do solo. Devido a isso, atenção especial deve ser dada ao manejo do solo, às culturas utilizadas e à água da irrigação, para evitar que ocorram alterações nas características do solo, causando a degradação das

propriedades físicas, químicas e biológicas, afetando a produtividade das culturas. O sucesso de um sistema de produção nas áreas irrigadas necessita de um grande aporte de resíduos culturais. Neste sentido, a inclusão de plantas de cobertura do solo no planejamento dos cultivos, proporciona, além de um alto potencial de produção de resíduos vegetais, a reciclagem e/ou fixação de nutrientes. A cobertura do solo em sistemas conservacionistas de manejo do solo influencia diversos outros processos no sistema solo-planta-atmosfera, os quais terão reflexos nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, e no estabelecimento e desenvolvimento vegetal.

Um sistema de produção sustentável é fundamentado por aspectos de conservação e preservação ambiental, mas também em aspectos econômicos e comerciais, sendo que o domínio deste processo pelo produtor é o que determina o sucesso da atividade. A maioria das propriedades rurais do Rio Grande do Sul ainda não apresentam graves problemas de doenças de plantas, porém a produção de monocultivos tende a alterar a biodiversidade da região. Mas, atualmente, a grande preocupação de pesquisadores, técnicos e produtores é em relação ao aumento da densidade do solo e diminuição da porosidade de aeração de solos intensamente cultivados. Para Dantas (1996) citado por Santos & Ribeiro (2000) em sistemas de cultivo intenso e com irrigação, as alterações nas propriedades físicas do solo são mais acentuadas e ocorrem em menor intervalo de tempo do que em outros sistemas de cultivo. Como alternativa, Reinert et al. (2001) afirmam que o tráfego de máquinas em sistemas irrigados deve ser realizado em maiores intervalos de tempo, após as irrigações, reduzindo a compactação adicional. Para esses mesmos autores, parte das limitações impostas pela degradação da estrutura dos solos associada ao uso agrícola podem ser aliviadas pelo manejo do conteúdo de água do solo.

Em um sistema conservacionista, como o sistema plantio direto, em decorrência das alterações físicas, químicas e biológicas, o tempo de implantação pode ser considerado um indicador de qualidade do solo. Em países com predominância de clima tropical e subtropical, como o caso do Brasil, devido às altas taxas de mineralização de teores de matéria orgânica, a adoção de sistemas de cultivos conservacionis-

tas, como o sistema plantio direto, proporciona menores perdas da qualidade do solo, quando comparado a sistemas que revolvem o solo. Já a fase Segundo Reichert et al. (2003), a bibliografia brasileira possui muita informação de condição da qualidade do solo, porém em sua maioria aponta somente as diferenças entre manejo de solo e plantas e uma ou poucas épocas, sem o monitoramento temporal. Na transição entre o sistema convencional para o sistema de plantio direto, vários fatores influenciam na qualidade do solo. Entre esses fatores, está a distribuição de poros, cuja avaliação permite qualificar e quantificar os poros existentes em um solo e a eficiência do sistema, conseqüentemente. A importância dessa distribuição e a influência do manejo do solo têm sido tema de vários estudos (Lal, 1974; Stone & Silveira, 1999; Borges et al., 1999).

---

## 9.5. Considerações finais

A evolução da irrigação nos últimos anos introduziu uma série de inovações tecnológicas que possibilitam aos equipamentos controlar de forma mais adequada e automatizada a aplicação

da água. Isto se traduz em um processo mais eficiente, permitindo manejar de forma mais precisa as demandas hídricas das culturas, de forma a possibilitar, assim, aumentos importantes na quantidade e melhorias da qualidade dos produtos explorados.

É necessário reconhecer a possibilidade de ocorrência de impactos negativos do uso da irrigação, avaliando-os e desenvolvendo soluções tecnológicas que promovam melhorias, viabilizando a atividade agrícola irrigada, de forma adequada. A compatibilização do uso correto dos recursos naturais, visando a respectiva sustentabilidade, com os benefícios gerados pela atividade irrigada, será capaz de produzir os efeitos positivos, resultantes da adoção da técnica.

O uso de modelos de programação da irrigação como o Sistema Irriga permite adequar a gestão da irrigação à demanda climática e tomar em conta a influência de outros factores, como o solo, sobre a demanda das culturas. Seguindo os resultados dos modelos é possível encontrar soluções de economia de água que contribuem também para minimizar os impactos ambientais

# 10. Manejo del agua en arroz: conservación y uso eficiente

G. Cantou, Á. Roel, A. Lavecchia y C. García

**Guillermina Cantou:** INIA Treinta y Tres, Uruguay.

Contacto: [gcantou@inia.org.uy](mailto:gcantou@inia.org.uy)

**Álvaro Roel:** INIA Tacuarembó, Uruguay

Contacto: [aroel@inia.org.uy](mailto:aroel@inia.org.uy)

**Andrés Lavecchia:** INIA Tacuarembó, Uruguay.

Contacto: [alavec@inia.org.uy](mailto:alavec@inia.org.uy)

**Claudio García:** INIA Las Brujas, Uruguay

Contacto: [cgarcia@inia.org.uy](mailto:cgarcia@inia.org.uy)

## 10.1. Introducción

El agua es un recurso que se vuelve cada vez más escaso en el mundo, debido a la disminución de su disponibilidad y calidad (por contaminación, eutrofización y salinización) y a la creciente competencia que ejercen al sector agropecuario otros sectores como el urbano e industrial. Ante este escenario, el uso eficiente del agua de lluvia y la optimización de su productividad se presentan como cuestiones prioritarias.

El cultivo de arroz en Uruguay se basa en general en un sistema de producción en rotaciones con pasturas e integrado con la producción ganadera, que permite considerarlo de baja intensidad e impacto ambiental. Estas características lo distinguen internacionalmente y le confieren la posibilidad de aprovechar estas ventajas comparativas y diferenciarse dentro de la región, pudiendo fortalecer simultáneamente la preservación de los recursos naturales. En los últimos 10 años, el cultivo ha ocupado un área anual promedio de 168 mil ha (DIEA-MGAP, 2009). El agua es un factor fundamental de la producción de arroz en Uruguay, ya que es de los pocos países en el mundo en donde el cultivo se realiza exclusivamente bajo riego por inundación continua, desde los 20-30 días posteriores a la emergencia hasta completar la madurez fisiológica.

A nivel nacional, el sector agropecuario utiliza -por medio del riego- el 90% de los recursos hídricos disponibles (sin contabilizar la generación de energía eléctrica) y de éste, más del

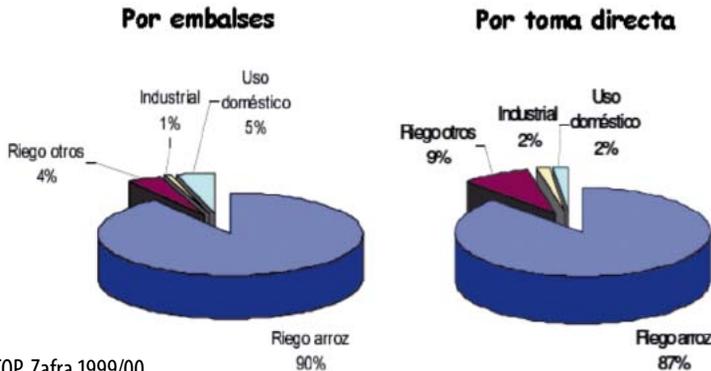
83% corresponde al cultivo de arroz (MVOTMA, 2002). Es por esto que este cultivo se convierte en un objetivo prioritario para las iniciativas de ahorro y conservación del agua. Una reducción del 10% del agua utilizada por el mismo dejaría disponible 200 millones de m<sup>3</sup> de agua, que podría ser usada por otros cultivos o sectores o incluso, para aumentar el área del propio cultivo. Hoy en día, el recurso agua está determinando la capacidad de crecimiento del sector arrocerero.

El Programa Arroz de INIA atribuye, dentro de sus planes de investigación, una significativa importancia a la relación entre la productividad y el uso de los recursos naturales. En este sentido, se viene generando información específica que pretende contribuir con la problemática actual de este recurso, destacando la importancia cada vez mayor de estrategias de manejo del agua de riego que contribuyan a su uso racional en el cultivo de arroz, así como estudios que permitan evaluar el impacto de las prácticas de manejo sobre el ambiente, de manera de preservar las buenas y corregir aquellas que tengan un efecto negativo.

## 10.2. Arroz - Uso del recurso a nivel nacional

En Uruguay, el sector agropecuario es el mayor consumidor de agua y dentro de este, el cultivo de arroz absorbe aproximadamente el 90% del total, ya que el 100% del área se desarrolla bajo riego por inundación, con siembra en seco (Figura 1).

**Figura 1:** Uso del agua para el total del país según volúmenes embalsados y caudales por toma directa.



Fuente: DNH-MTOP. Zafrá 1999/00

Históricamente el cultivo de arroz se desarrolló en la cuenca de la Laguna Merín., en los suelos planos ubicados en las márgenes de ríos, arroyos o lagunas, contando con importante disponibilidad de agua. A partir de 1990 ocurre una fuerte expansión arrocerá, fundamentalmente, hacia zonas no tradicionales del país (Norte y Centro), incrementándose significativamente la presión sobre los recursos hídricos. Esto fue acompañado por una intensificación en la construcción de embalses, los cuales fueron financiados mayoritariamente por el sector privado. El sector público ha contribuido en algunos proyectos de riego a través, por ejemplo, del Programa de Manejo de Recursos Naturales y Desarrollo del Riego (PRENADER, periodo de ejecución 1994-2000), que fomentó el desarrollo

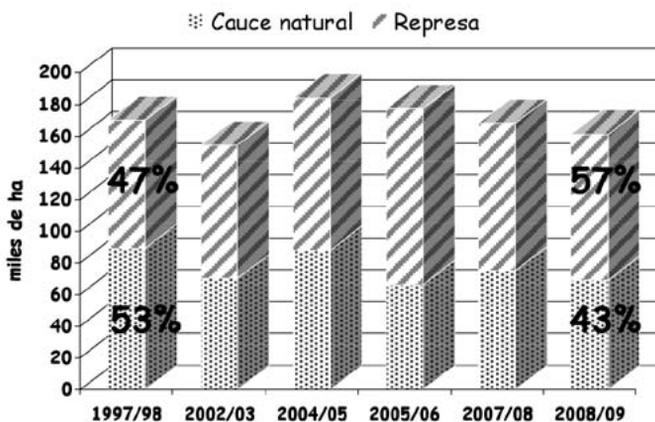
del riego mediante subsidio y créditos a largo plazo, en proyectos orientados a la creación de fuentes de agua con énfasis en el manejo racional del agua y de los suelos (Aquastat-FAO, 2000).

Actualmente, la mayor parte del agua usada proviene de represas (Figura 2), área que representa más del 54% de la superficie sembrada (DIEA-MGAP, 2009).

### Énfasis de la investigación

El volumen de agua utilizado por el cultivo de arroz puede alcanzar cifras muy importantes y en general, es altamente variable entre productores. El consumo promedio de agua en el arroz

**Figura 2:** Superficie regada por zafrá, según fuente de agua disponible.



Fuente: elaboración propia en base a DIEA-MGAP, 2009.

puede estimarse en 12.000 m<sup>3</sup>/ha, dependiendo de las condiciones climáticas y cantidad de lluvia caída en el período, del tipo de suelo y, fundamentalmente, del manejo del agua que realice el productor.

El Proyecto Riego del Programa Arroz de INIA ha venido trabajando con el objetivo de estudiar como los diferentes manejos del riego afectaban el comportamiento productivo de los materiales genéticos disponibles a nivel comercial. De esta manera se investigó en aspectos como: momento de la inundación, altura de lámina de agua, falta de riego en diferentes etapas fenológicas, retiro de agua para cosecha. Desde los inicios de la Estación Experimental del Este, cuando funcionaba dentro de la órbita del Centro de Investigaciones Agrícolas Alberto Boerger (CIAAB), se le dio especial importancia a la necesidad de determinar el consumo de agua del cultivo de arroz. Las primeras mediciones fueron realizadas en la zafra 1979/80 (Cuadro 1), en la Unidad Experimental de Paso de la Laguna (UEPL), ubicada en Treinta y Tres.

Para el período analizado y bajo el manejo de agua realizado se determinó que el aporte promedio por riego era de 5.981 m<sup>3</sup>/ha, lo que sumado al suministro por agua de lluvia totalizaba 11.679 m<sup>3</sup>/ha (Blanco, 1989). En este mismo período, también se realizaron mediciones en chacras comerciales en la zona Este del país, mediante la utilización de aforadores volumétricos totalizadores colocados en la entrada de agua de la chacra. Dado que cada productor manejaba el agua de acuerdo a su criterio (es decir, a lo que entendía que era necesario para su cultivo y de acuerdo a las disponibilidades), en estos trabajos se evidenciaban las grandes diferencias en

consumo de agua que existían entre ellos, con un amplio rango de consumos que iban entre 10.000 y 26.000 m<sup>3</sup>/ha. Los productores ineficientes, desde este punto de vista, gastaban hasta cuatro veces más agua para regar. Estas diferencias en volumen de agua utilizada en el riego, no se vieron reflejadas en el rendimiento de grano, es decir, aquellos productores que 'gastaban' más agua no necesariamente eran aquellos que obtenían los mayores rendimientos, sino que por el contrario generalmente estaba asociado con el mal manejo de la chacra y por lo tanto con bajos rendimientos (Blanco, 1989).

A partir 1995, INIA comenzó a enfocarse en la búsqueda de tecnologías y prácticas de manejo que permitan hacer un uso más eficiente del recurso hídrico, teniendo en cuenta la interacción del riego con los demás factores de manejo (ej.: variedades, fertilización, malezas, tipo de suelo, enfermedades, tipo de siembra, etc.). Se llevaron a cabo actividades para determinar el manejo del riego de los principales cultivares en diferentes ambientes, así como para evaluar y ajustar tecnologías de riego alternativas que permitan realizar un uso más eficiente del recurso.

En este contexto, se priorizó la necesidad de comenzar a contabilizar objetivamente a escala semi-comercial (macroparcelas), los volúmenes de agua consumidos por dos manejos contrastantes de la inundación, luego de varios años de evaluación en ensayos parcelarios (Roel y Blanco, 1997; Roel, 1998; Roel, 1999a) con el objetivo de poder establecer la productividad del agua en cada uno de ellos. A través de estos trabajos se pudo constatar que un período mayor de inundación no necesariamente se traduce en un mayor gasto total de agua (Roel, 1999b). Se

**Cuadro 1.** Consumo de agua (Blanco, CIAAB 1989).

<b>Año</b>	<b>Baños</b>	<b>Inundación</b>	<b>Reposición</b>	<b>Total riego</b>	<b>Lluvias</b>
1979/80	2305	1309	3725	7419	5943
1980/81	745	1467	4240	6542	3287
1981/82	1450	1685	3943	7033	4829
1983/84	1980	1900	1990	5870	7430
1985/86	1000	1500	3500	6000	4784
1986/87	1510	900	1930	4240	6350
1987/88	-----	1420	3396	4816	7250
<b>Promedio</b>	<b>1284</b>	<b>1465</b>	<b>3232</b>	<b>5981</b>	<b>5698</b>

**Cuadro 2.** Consumo (m<sup>3</sup>) y productividad del agua para la variedad INIA Tacuari.

ZAFRA		1996/97	1997/98	1998/99
Inundación temprana (15 DDE)	Baños	---	---	---
	Inund.	1088	755	590
	Mant. inund.	5132	2628	3880
	Total riego	6220	3383	4470
	Lluvias	2838	9230	3929
	<b>Total (m<sup>3</sup>)</b>	<b>9058</b>	<b>12313</b>	<b>8399</b>
	<b>Rendimiento (kg/ha)</b>	<b>7350</b>	<b>6300</b>	<b>7700</b>
<b>Productividad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>0,81</b>	<b>0,51</b>	<b>0,92</b>	
Inundación tradicional (45 DDE)	Baños	2548	935	1777
	Inund.	744	910	1220
	Mant. inund.	4770	2686	3069
	Total riego	8062	4531	6066
	Lluvias	2838	9230	3929
	<b>Total (m<sup>3</sup>)</b>	<b>10900</b>	<b>13761</b>	<b>9995</b>
	<b>Rendimiento (kg/ha)</b>	<b>7050</b>	<b>6450</b>	<b>8550</b>
<b>Productividad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>0,65</b>	<b>0,47</b>	<b>0,86</b>	

DDE: Días después de emergencia.

comprobó que en la inundación temprana (realizada 15 días después de la emergencia –DDE-), el volumen de agua requerida fue siempre inferior respecto a la inundación tradicional (45 DDE), utilizándose en promedio un 25% menos de agua (Cuadro 2). El agua utilizada por concepto de baños<sup>1</sup>, en el caso del manejo de la inundación tradicional, fue el principal determinante de las diferencias entre los manejos del agua. Su importancia en el total del agua suministrada fue realmente significativa, de entre un 20% y un 32% del total. Esto determina que en la medida que se pueda acortar la etapa de baños, que además es ineficiente desde el punto de vista de los nutrientes y en el control de las malezas, se estaría realizando un uso más eficiente del recurso.

La productividad del agua (definida como la cantidad de granos producidos en relación al volumen de agua utilizada) fue siempre superior en el caso del manejo de la inundación temprana, fundamentalmente debido a los menores consumos de agua registrados con este último manejo y a que no hubo diferencias claras en el rendimiento promedio final de ambos tratamientos.

1 Práctica común en el cultivo de arroz de Uruguay, la cual consiste en regar el cultivo (previo al momento de inundación definitivo), con el objetivo de favorecer la emergencia y/o el desarrollo de la planta de arroz, fundamentalmente cuando el suelo se seca demasiado.

Más recientemente, los trabajos se enfocaron en la determinación del manejo eficiente de la inundación (Cantou et al., 2008 y 2009). Para cuantificar el consumo de agua de los distintos tratamientos de inundación, se dispuso de aforadores (contadores de agua) que permitieron regar cada tratamiento en forma independiente. El criterio de riego utilizado fue el mismo para todos los tratamientos y consistió en mantener una lámina de agua continua de 10 cm de profundidad y dejar de suministrar agua a los 20 días después del haber alcanzado el 50% de floración. Este último criterio fue establecido en base a los resultados obtenidos en ensayos experimentales anteriores, realizados con el objetivo de determinar el efecto del momento de retiro de agua sobre el rendimiento y la calidad industrial del grano de distintas variedades de arroz. Este manejo permite reducir el período de riego y por lo tanto, racionalizar el uso de agua (Segovia, 2007; Molina et al., 2007; Cantou, 2008).

En el Cuadro 3 se presenta el resultado obtenido para la zafra 2008/09. Se resalta el hecho de que se midió el agua que efectivamente entró a la parcela y por lo tanto, no se incluye en el valor las posibles ineficiencias del sistema de riego desde la captación del agua hasta la llegada a la parcela. Tampoco se considera el aporte del agua de lluvia.

Si analizamos los resultados en términos de la productividad del agua, vemos que este valor

**Cuadro 3.** Efecto del momento de la inundación sobre el rendimiento, el consumo y la productividad del agua para las variedades INIA Olimar y El Paso 144 (Zafra 2008/09).

Inundación (DDE)	Ciclo (días)	Rendimiento (kg/ha)	Consumo de agua (m <sup>3</sup> /ha)	Período de riego (días)	Prod. del agua (kg/m <sup>3</sup> )
<b>INIA Olimar</b>					
15	130	12087	7313	87	1.65
30	133	11767	6474	77	1.90
45	143	12193	6520	72	2.01
60	151	12398	7472	60	1.91
<b>Media</b>	139	12111	6945	74	1.86
<b>El Paso 144</b>					
15	139	12606	7794	95	1.62
30	141	12069	7022	83	1.72
45	147	12213	6616	76	1.85
60	147	12664	6801	62	1.86
<b>Media</b>	144	12388	7058	79	1.76

DDE: Días después de emergencia.

estuvo en el entorno de 1.69 kg/m<sup>3</sup>. Dado que el desempeño productivo entre variedades y momentos de inundación fue similar (no hubieron diferencias significativas), la productividad del agua estuvo asociada, fundamentalmente, al volumen de agua suministrada. La variedad de arroz INIA Olimar presentó una eficiencia 6% superior respecto a El Paso 144, dado por las diferencias en el largo del ciclo (y de las distintas etapas fenológicas). El tratamiento de inundación de 15 DDE produjo 18% y 12% menos de arroz por m<sup>3</sup> de agua respecto al resto de los tratamientos, para Olimar y El Paso 144, respectivamente. Es importante resaltar que en esta zafra (2008/09), el clima favoreció a los tratamientos tardíos dado que el aporte por agua de lluvia en los momentos de mayor requerimiento del cultivo fue mayor en estos tratamientos respecto a los tempranos.

Todos los trabajos mencionados anteriormente han contribuido a un cambio significativo en el manejo del riego a nivel de la producción, donde se destaca el adelantamiento del momento del establecimiento de la inundación y la disminución de los baños. A finales del siglo xx tradicionalmente se realizaban en promedio 2 baños y la inundación se realizaba aproximadamente a los 45 días después de la emergencia del cultivo. En la actualidad gran parte del cultivo es inun-

dado antes de los 30 días después de la emergencia con la correspondiente disminución de los baños (Molina et al., 2009).

### 10.3. El contexto actual y las oportunidades

#### Estrategias para un uso racional del recurso

En función de los aspectos mencionados anteriormente en relación al agua, resulta cada vez más importante que los productores arroceros adopten estrategias de manejo que contribuyan al uso racional de este recurso. Entre estas estrategias se pueden destacar las siguientes: 1) sistematización de la chacra, 2) construcción de las taipas en forma anticipada, 3) reducción de las pérdidas de agua por infiltraciones laterales (escurrimiento superficial) y percolación, 4) reducción del período de riego, 5) control de la lámina de agua, 6) utilización de variedades de arroz de ciclo más corto, y 7) uso de sistemas de riego intermitente. Ninguna de ellas puede ser aplicada en forma aislada y la correcta combinación de todas ellas es la clave para lograr el uso racional del recurso. El riego intermitente, se basa en reducir los improductivos flujos de salida (pérdidas laterales y percolación) y aumentar

la productividad del agua. En vez de formar una lámina de agua de 10 cm, la altura de la misma se disminuye, manteniendo el suelo saturado o imponiendo un régimen en donde se alternan periodos de suelo húmedo y seco. Sin embargo, la literatura señala que esta tecnología puede resultar en una reducción del rendimiento con las actuales variedades de arroz (Bouman y Tuong, 2001; Tabbal et al., 2002), principalmente, cuando se deja secar el suelo.

El Programa Arroz de INIA Tacuarembó en conjunto con el equipo técnico del establecimiento “El Junco”, vienen trabajando desde el 2006 en la temática del uso eficiente del agua en el cultivo de arroz (Böcking et al., 2008 y Lavecchia, 2009). De dichos trabajos se determinó que la implementación del riego intermitente permitió disminuir el consumo de agua en un 25% (promedio de tres años de ensayo). Si bien el efecto sobre el rendimiento no ha sido consistente, sí lo fue en aumentar la eficiencia del uso del agua. El riego intermitente obtuvo en promedio un 13% más de arroz por m<sup>3</sup> de agua utilizada respecto al riego continuo (Böcking et al., 2008).

En la zafra 2009/2010, INIA Treinta y Tres llevó a cabo un experimento para evaluar distintos sistemas de riego: dos tratamientos de riego intermitente y tres de riego continuo con diferentes fechas de inundación del cultivo. El criterio de suministro de agua para los tratamientos de riego intermitente fue el siguiente:

- RI5: después del inicio del riego, se establece una lámina de 5cm de profundidad y el rie-

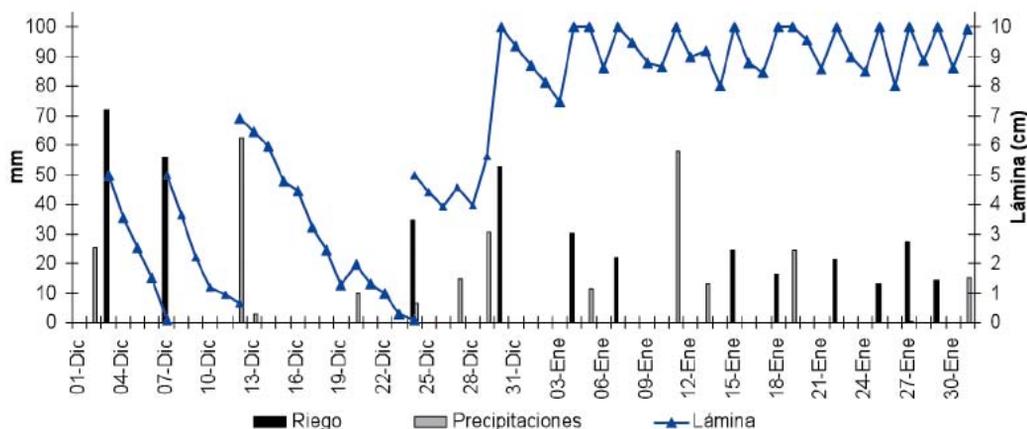
go se suspende hasta que el suelo se encuentre en estado saturado (encharcado). En este momento se reestablece nuevamente la lámina de 5cm,

- Riego restrictivo: cuando se consume (evapotranspira) el 50% del agua disponible en el suelo, se suministra agua de manera de que este quede saturado. Por lo tanto en este tratamiento ocurre alternancia de suelo húmedo y seco.

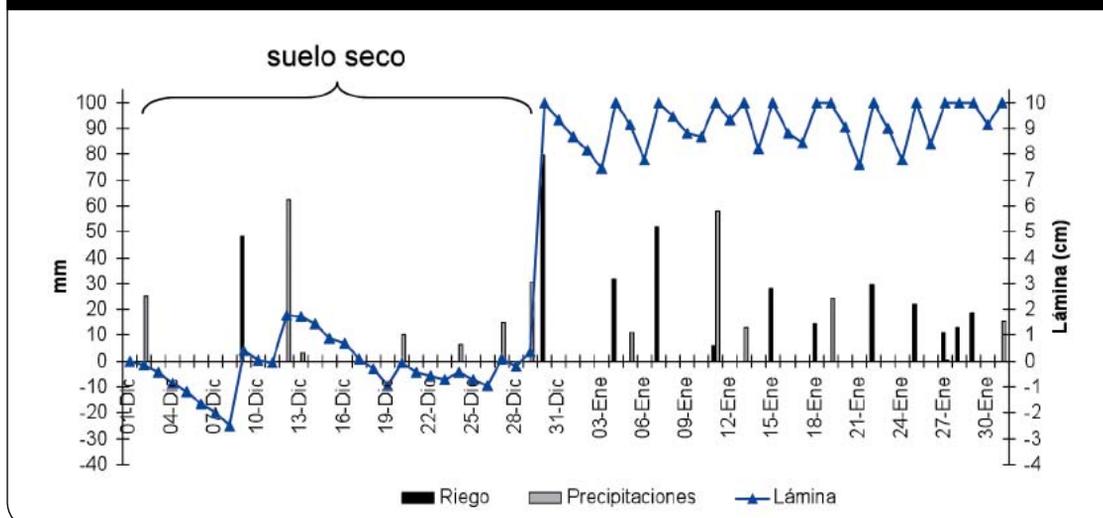
En ambos casos el riego intermitente se inicia a los 30 DDE y se lleva a cabo hasta la etapa de primordio, momento a partir del cual el riego se vuelve continuo, con una lamina promedio de 10 cm (Figuras 3 y 4).

Se determinó que las reducciones en el consumo de agua por parte de los tratamientos de riego intermitente fueron mayores (en términos porcentuales) que las perdidas en rendimiento y por lo tanto, la productividad del agua respecto al total de agua suministrada tienden a ser mayores, si bien estadísticamente no son diferentes (Cuadro 4). Las altas productividades obtenidas se deben a que solo se consideró el suministro de agua por riego. En el Cuadro 5 se presentan los resultados incluyendo en el consumo total de agua, el aporte de las precipitaciones (que en esta zafra fueron muy abundantes: 823 mm para el período 5 de noviembre - 9 de marzo).

**Figura 3:** Esquema del riego intermitente con lámina de 5cm hasta primordio (Tratamiento RI5). UEPL-INIA, Treinta y Tres, zafra 2009/2010.



**Figura 4:** Esquema del riego intermitente restrictivo hasta primordio (Tratamiento Restrictivo). UEPL-INIA, Treinta y Tres, zafra 2009/2010.



**Cuadro 4.** Efecto del sistema de riego sobre el rendimiento, el consumo y la productividad del agua para la variedad INIA Olimar (Zafra 2009/2010).

	Ciclo (días)	Rendimiento (kg/ha)	Consumo de agua <sup>1</sup> (m <sup>3</sup> /ha)	Período de riego (días)	Prod. del agua (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Riego continuo (en DDE)</b>					
15	126	10495 a	4884	73	2,15
30	129	10279 a	4914	59	2,09
45	136	10491 a	4937	58	2,12
<b>Riego intermitente</b>					
RI <sub>5</sub>	130	9773 a	3959	57	2,47
Restrictivo	130	8965 b	3801	64	2,36
<b>Media</b>	<b>130</b>	<b>10001</b>	<b>4499</b>	<b>62</b>	<b>2,22</b>
<b>P.(Trat.)</b>	---	<b>&lt;0,01</b>	<b>ns</b>	---	<b>ns</b>

<sup>1</sup> Agua suministrada por riego.

Letras diferentes difieren significativamente para P<0,05. P: Probabilidad; ns: diferencias estadísticamente no significativas; DDE: Días después de emergencia.

**Cuadro 5.** Efecto del sistema de riego sobre el consumo y la productividad del agua, considerando el agua de lluvia (Zafra 2009/2010).

	Consumo de agua <sup>1</sup> (m <sup>3</sup> /ha)	Productividad del agua (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Riego continuo(en DDE)</b>		
15	11936 a	0,88
30	12059 a	0,85
45	10336 b	1,04
<b>Riego intermitente</b>		
RIS	10028 b	0,98
Restringido	9884 b	0,92
<b>Media</b>	<b>10849</b>	<b>0,94</b>
<b>P.(Trat.)</b>	<b>0,01</b>	<b>ns</b>

<sup>1</sup> Agua suministrada por riego más precipitaciones.

Letras diferentes difieren significativamente para  $P < 0,05$ . P: Probabilidad; ns: diferencias estadísticamente no significativas; DDE: Días después de emergencia.

### Agregado de valor a través de la gestión ambiental

Ante la búsqueda constante de aumento de la productividad y maximización de las ganancias, la agricultura moderna emplea una alta carga de agroquímicos. El cultivo de arroz no escapa a esta problemática, fundamentalmente en lo que respecta al uso de herbicidas, los cuales se aplican aproximadamente en el 96% del área de arroz sembrada. De aquí la importancia de comenzar a generar información nacional respecto a la disipación de estos herbicidas en las condiciones de clima, manejos y suelos de Uruguay, de manera de delinear prácticas de manejo acordes. El uso inadecuado de agroquímicos y el inapropiado manejo del agua puede causar efectos adversos en el ambiente.

Según la Fundación de Protección Ambiental de Río Grande del Sur (FEPAM, 2006), el cultivo de arroz constituye una actividad de alto potencial de contaminación puesto que el riego aumenta las posibilidades de transporte de agroquímicos vía agua de lluvia y drenaje para recursos hídricos superficiales y vía lixiviación para los subterráneos. Es claro que para que ese potencial no se convierta en un impacto negativo real se necesitan aplicar las Buenas Prácticas Agrícolas, tal cual las recién

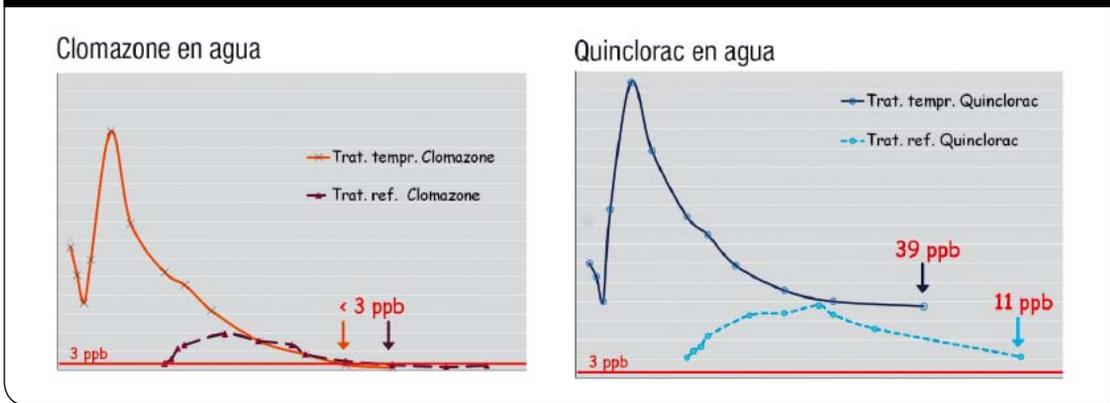
mente generadas por la Gremial de Molinos Arroceros, INIA, LATU y UdelaR Facultad de Agronomía (ACA et al., 2009), cuya implementación permitirá garantizar la producción sustentable del arroz y dará un mayor valor agregado al producto final.

En la necesidad de ir generando información específica sobre la compatibilidad ambiental del sistema de producción arroceros, ha sido estrategia del Programa Nacional de Arroz y del Programa de Producción y Sustentabilidad Ambiental de INIA, incluir el estudio del impacto ambiental dentro de sus planes de investigación, así como promover y articular proyectos con distintas instituciones públicas y/o privadas, bajo la modalidad de Fondos de Promoción de Tecnologías Agropecuarias (FPTA).

En este marco, se ejecutó el FPTA N° 226 “Inmunoensayos como herramientas analíticas de bajo costo para el monitoreo sustentable de la producción agrícola y su impacto ambiental”, llevado a cabo por la Cátedra de Inmunología y Orgánica de la Facultad de Química. En la zafra agrícola 2008/2009 y 2009/2010 se instaló un ensayo en la UEPL-INIA, con el objetivo de determinar los niveles de concentración de los herbicidas *Clomazone* y *Quinclorac* en agua, suelo y grano; y evaluar su interacción con el manejo del agua del cultivo de arroz. Para ello se trabajó con dos tratamientos de riego que consistieron en inundar el cultivo 15 días después de la emergencia (tratamiento temprano) y 30 días después de la misma (tratamiento referencia).

Respecto a los principales resultados obtenidos en la primera zafra de evaluación para las determinaciones en agua, se destaca el hecho de haber desarrollado una nueva herramienta analítica, sencilla, selectiva y de bajo costo para la determinación de residuos de *clomazone* en agua, basados en estudio inmunológicos, con un límite de sensibilidad por debajo del límite máximo de residuos de plaguicidas establecido por la Unión Europea para aguas superficiales. El manejo del agua afectó el comportamiento de los herbicidas en el ambiente (Figura 5), ya que las concentraciones de los compuestos en agua fueron siempre inferiores en el tratamiento de referencia respecto al temprano (Cantou et al., 2009).

**Figura 5:** Concentración de *Clomazone* y *Quinclorac* en agua para los tratamientos de riego temprano y de referencia. UEPL-INIA, Treinta y Tres, zafra 2008/2009. Tratamiento temprano: inundación el 19 noviembre. Tratamiento referencia: inundación el 3 diciembre.



De los datos obtenidos, resulta importante adoptar y delinear prácticas de manejo del agua que eviten o minimicen el movimiento de ésta hacia fuera del cultivo en los primeros días luego de la inundación (fundamentalmente ante inundaciones tempranas del cultivo) y en el/los baño/s que se realicen, de manera de preservar la calidad de los recursos hídricos. Esta línea de investigación impulsada permite ir generando información acerca de cómo las prácticas de manejo actuales interaccionan con los niveles de disipación de los agroquímicos y constituye el pilar inicial para delinear buenas prácticas de manejo que permitan alcanzar buenos nive-

les productivos, preservando a su vez el medio ambiente.

Es claro que el futuro demandará cada vez en mayor grado la integración de conceptos de productividad, con eficiencia del uso e impacto ambiental, es por esto que enfoques cómo los vinculados a los estudios de la huella del agua y análisis de ciclo de vida de los sistemas de producción y cadenas de valor, son cada vez de mayor importancia y deberán de ir integrándose a los trabajos realizados de manera de poder orientar las principales acciones a tomar (Chapagain y Orr, 2008).



# 11. Riego en agroenergía predial

J.P. Carnelli

Ing. Agr. Juan P. Carnelli: ALUR S.A. Paraje Colonia España.  
Bella Unión- Uruguay. Contacto: [jcarnelli@alur.com.uy](mailto:jcarnelli@alur.com.uy)

## 11.1. Resumen

Las riquezas productivas de Uruguay provienen en buena medida de la explotación de los recursos naturales: clima, suelo, agua y relieve. La estrategia de mantener el sistema agropecuario productivo, pasa por considerar la sostenibilidad de todos los recursos naturales y los consumos de energía. Unir la combinación del conocimiento sobre riego, con los factores agrícolas manejables disponibles, para producir agroenergía predial renovable y dar consolidación y sostenibilidad al sistema productivo agropecuario. Toda investigación y tecnología aplicada debe tener en forma explícita las orientaciones estratégicas que la sustentan. El presente análisis pauta estas estrategias en la importancia de la competitividad en sentido amplio, la concepción de la integralidad necesaria y la trascendencia de las visiones globales frente a los recursos escasos.

**Palabras clave:** Sistema, riego, agroenergía, clima, suelo.

## 11.2. Consideraciones previas

El análisis de resultados de investigaciones y tecnologías aplicadas, como en el presente trabajo, existe una serie de orientaciones estratégicas que muchas veces o están explícitas y condicionan el análisis y sus resultados o lo que es peor no están explícitas e igualmente lo condicionan, pero sus conclusiones lejos de ser transparentes generan verdades o paradigmas que muchas veces no son generalizables.

En la descripción que se realiza a continuación existen algunas premisas utilizadas que hacen referencias a:

- La competitividad de una empresa agrícola, está directamente relacionada con la eficiencia y productividad de todos los factores que combina en forma integral junto a la distribución pautada o esperada del valor que genera y del comportamiento y facilidades del entorno.
- La integralidad del análisis es de tal importancia, que cuando se analiza una solución en materia de aplicación tecnológica, donde los gastos de inversión deben ser solventados por la adopción de endeudamiento, debe de tenerse especialmente en cuenta que los mismos no hagan inviable las eficiencias tecnológicas de la solución propuesta, dejando fuera de competitividad a los productos finales obtenidos.
- Soluciones globales versus soluciones individuales. La importancia de analizar frente a recursos que aunque disponibles, pueden transformarse en escasos o puede hacerse uso indebido de los mismos, es la posibilidad de encarar soluciones de carácter comunitario que trasciendan las soluciones individuales.

## 11.3. Introducción

El incremento de la necesidad de alimentos en el mundo es evidente y más aún la demanda de agua. La escasez en el mundo alcanza al agua líquida para consumo directo como para producir alimentos. Los sistemas de producción primarios así como la incorporación de valor agregado por la industria, son dependientes de energía exógena. La estrategia de mantener el sistema agropecuario productivo, pasa por considerar la sostenibilidad de todos los recursos naturales y los consumos de energía. Unir la

combinación del conocimiento sobre riego, con los factores agrícolas manejables disponibles, para producir agroenergía predial renovable y dar consolidación y sostenibilidad al sistema productivo agropecuario.

## 11.4. Restricciones

### Restricciones de agua

Para el año 2030 se estima que la población mundial alcance a 5200 millones de personas en el medio urbano (Leopold Center Progress Report, 1995). Un 70 % de este crecimiento tendrá lugar en países del tercer mundo. Esto indica que la base productiva no crecerá sustancialmente y las opciones se concentran en aumentar la productividad por unidad de insumo, haciendo y manteniendo la intensidad productiva sobre los factores: tierra, agua y energía.

Uruguay se encuentra en las proyecciones entre los países con buena disponibilidad del recurso agua, para afrontar los incrementos en la producción de alimentos (Leopold Center Progress Report, 1995). De mantenerse la relación que el 40 % de los alimentos del mundo provienen del 18% de tierras regadas, la proyección de expansión de 120 millones de hectáreas, se hará sobre la base de tierras de regadío.

Dado el privilegio de disponer de agua, se podrán combinar los recursos técnicos hidráulicos y sobre todo los de organización para la gestión del agua, máxime que los riegos son complementarios de las lluvias. La combinación de las situaciones productivas prediales con las opciones técnicas, habrán de ser enfocadas a lograr mejores eficiencias y productividad competitiva.

### Restricciones de suelos

La presión sobre los suelos agrícolas va en aumento y comienzan a entrar al proceso suelos de menor aptitud y mayor riesgo del recurso natural. Las opciones son tecnologías aplicadas por técnicos que conocen de su evolución y origen en la aplicación y validación de nuevas demandas o mayor intensidad de uso. El recurso propiedades físicas es el menos recuperable y con mayor riesgo frente a la intensidad de cultivos y laboreos. Propiedades físicas degradadas significa afectar la relación suelo-planta-atmósfera

del suelo en desequilibrios poco perceptibles en el corto plazo pero la propia evolución del paisaje con la participación productiva tiende a destruirlos si no los protegemos.

### Restricciones de energía

Ésta es la restricción más cercana en la situación productiva uruguaya. El crecimiento de las exportaciones de cereales se está realizando sobre la base de explotaciones de los recursos naturales clima, suelo y relieve. No obstante la relativa abundancia de esos factores quedan disminuidos por la carencia de energía en el proceso productivo. “Con las previsiones de aumento de la riqueza del país, por cada 1% que crece el producto interno bruto (PIB), la demanda de energía crece un 0.7% para atender las necesidades productivas y también las necesidades sociales que ese crecimiento genera”, expresó el Ministro de Industria y Energía, Roberto Kreimerman (AFP, 2010).

Uruguay tiene además de clima, suelo y relieve favorable la disponibilidad de agua dulce para riego. Como con frecuencia ha ocurrido, las modernizaciones de los sistemas de riego han venido por el lado de las infraestructuras, con incorporación de recursos de capital uruguayo como mercado de industrias externas, sin embargo el escenario es que estamos frente a la no disponibilidad de energía para la producción agropecuaria. La estrategia de eficiencias en las operaciones agrícolas debe ir acompañada de la racionalización del uso energético y la creación y aplicación de energía renovable. Aunque dispusiéramos de la infraestructura y la gestión adecuada de riego, quedan inhabilitadas por la carencia energética.

La producción ganadera ha experimentado crecimientos excepcionales, ha agregado calidad en el producto final mejorando la sanidad y trazabilidad, así como la alimentación animal por disponibilidad y alta calidad, apoyados por productos de la agricultura. La adecuación del producto final animal al cliente ha sido con mayor uso de energía, tanto en la producción de granos como en la seguridad de producción mediante el riego. Esta combinación ha sido competitiva y se han alcanzado mercados externos.

La última inversión alta, de los sistemas de riego con medidas de políticas que mejoran el contexto arrocero en competitividad, ha sido la electrificación de los bombeos diesel. No obs-

tante, el consumo de agua dulce por kilogramo de arroz producido no ha variado. Esto conlleva a una interpretación de sobredimensión de los levantes o bien con capacidad de bombeo para superficies mayores que las actuales de los productores beneficiarios del proyecto. O sea se hizo una reserva de inversión con expectativas de aumento del área de producción, coincidente con la demanda futura más alta de alimentos.

Los cultivos regados con eficiencia son los cultivos citrícolas, otros frutales y riego de huertas con sistemas de riego localizados, que han encontrado justificación para la inversión por el volumen de exportación y calidad exigida por los mercados externos. También se riega maíz y otros cultivos de alto valor con sistemas presurizados por aspersión cuando la falta de lluvias y las coyunturas de precios son favorables. Ocasionalmente frente a emergencias de sequías, con fuentes de agua casi siempre limitadas, se optó por riegos por aspersión de praderas y cultivos forrajeros.

El arroz y la caña de azúcar son los cultivos de riego por superficie tradicionales, con menor eficiencia y los de mayor volumen de agua dulce consumida. Estos sistemas son, sea por uso de energía eléctrica sobredimensionada o por bombeos a gasoil, los de mayor dificultad para alcanzar eficiencias energéticas. Mayor aún en caña de azúcar donde los sistemas de riego en su origen, por inversiones privadas, tienen mucho de transitoriedad ya que hay años en que las lluvias abundantes no justifican económicamente regar. La situación cambia en la propuesta actual de producción de etanol para incorporar a las

naftas y la opción de estabilidad de producción y la indispensable reducción de costos del cultivo.

La responsabilidad en el uso de los recursos para dar estabilidad de producción competitiva del sector agropecuario, es principalmente de la agricultura. Le compete dar expresión productiva a las mejoras genéticas modernas, captando las energías disponibles en la fotosíntesis con las opciones de cultivos adaptados a las condiciones de los predios uruguayos, conservando el ambiente sano.

A nivel agrícola principalmente la energía con mayor amenaza actual y futura es la de fuentes de petróleo. No sólo por lo finito de la fuente física, sino además por los precios, cada vez menos alcanzables para producir materia prima en forma competitiva.

La agricultura consume energía en varias formas incluye líquida como combustibles y lubricantes; fertilizantes, pesticidas y electricidad. Total o parcialmente son productos importados.

En la agricultura de regadío sin electrificación, los costos energéticos más altos son los agroquímicos y combustible. En ausencia de infraestructura la opción supletoria podría ser la mejora en el conocimiento de regar y la organización o sea la gestión del agua.

En 1986 se realizó para la producción de caña de azúcar en Bella Unión (Latitud 30°19'41" S; Longitud 57°37'12" W; Altitud 49 *msnm*) un relevamiento predial de información de consumos de gasoil por año en los sistemas de riego. El cuadro 1 muestra algunos casos.

**Cuadro 1.** Consumo de combustible en predios de productores de caña de azúcar bajo riego por surcos.

Productor	Area (ha)	Producción (ton)	Consumo Gasoil (litros)	Energí GasoilMJ(**)
1	18,5	1298,2	5192,2	202497,7
2	5	3996	13702	534378
3	1	614	2160	84240
4	119	7972,5	2082	81198
5	1	339,1	2328	90792
6	32,5	2155	15341	598299
7	163	10700	2934	114426
*8	9	7790	29919	1166841

(\*\*) Gasoil: 39/MJ/litro.(Alonso-Pippo et al., 2009)

Seguramente los valores de eficiencia de los equipos de bombeo se pueden mejorar de todas maneras estas son condiciones reales de campo, relativamente frecuentes.

### 11.5. Agroenergía predial

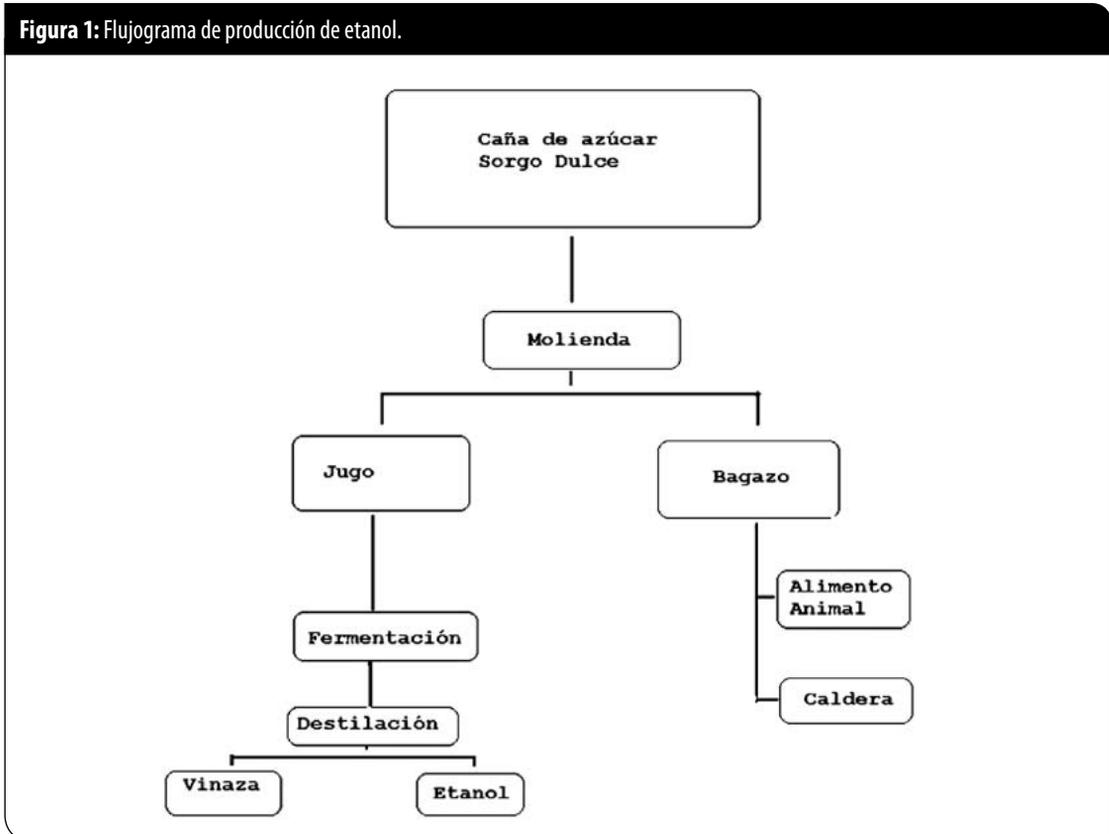
La agroenergía de autoabastecimiento predial, tiene varias opciones. Nos vamos a referir en este trabajo a las fuentes con capacidad de uso en sustituir las energías convencionales, sin demasiadas modificaciones. Los estudios y trabajos en producción de etanol se han situado en Bella Unión, principalmente por la tradición de la caña de azúcar y la influencia brasileña. Ante una estrategia nacional de biocombustibles agrícolas pueden cambiar los centros de producción en forma competitiva. La competitividad agrícola se basa en la eficiencia de la fotosíntesis y el ambiente donde se expresa, en términos globales comenzando con la radiación solar y la temperatura ambiente. En ese sentido, y pensando en plantas C4 y cultivos anuales, las empresas al Suroeste del Uruguay tienen buenas perspectivas técnicas.

### Etanol

En el Norte, siguiendo los usos de la caña de azúcar en Brasil y frente a la crisis del petróleo de 1970, nace el *Proálcool*, la opción de etanol fue desarrollada en un proyecto experimental elaborado por técnicos de IICA (Brasil-Uruguay), Facultad de Agronomía (UDELAR), MGAP y Calnu (1986), integrándose una Red Latinoamericana de Agroenergía, en Bella Unión. Se trató de un sistema integrado energía y alimentación animal. Este proyecto se elaboró como fuente de energía líquida y etanol proveniente de caña de azúcar y otras fuentes a partir de sólidos y efluentes.

La producción de etanol hidratado, se proyectó para producir en una microdestilería. ALUR S.A. actualmente está trabajando esta opción para localidades alejadas de ALUR Bella Unión, con posibilidad de producir caña de azúcar o sorgo dulce. La unidad de destilería es de 1.000 litros/día (se encuentran en el mercado desde 100 a 5000 litros/día). Consume aproximadamente 20 t. por día de sorgo dulce, produce 10.000 litros

Figura 1: Flujoograma de producción de etanol.



de jugo, del cual se obtienen 1000 litros de etanol hidratado, 95° GL (Figura 1).

Los azúcares en el sorgo dulce tienen muy poca estabilidad, deben ser procesados inmediatamente. Así el etanol hidratado en las microdestilerías, se almacena y luego se transporta a la planta deshidratadora de ALUR Bella Unión, para luego ser mezclado con las naftas en ANCAP.

La producción de etanol también produce un efluente, a razón de 12-15 litros de vinaza por litro de etanol. Se obtendría en promedio 13 metros cúbicos en la destilería de 1000 litros día. Este producto es un contaminante ambiental también contiene cantidades importantes de potasio, fósforo y materia orgánica. Se lo puede acondicionar para aplicarlo al suelo como enmienda y en la producción de alimento animal.

También del proceso industrial se obtiene bagazo, fibra vegetal, que se destina a la alimentación animal o en la caldera de producción de vapor.

### Producción de sorgo dulce

Las primeras experiencias de las que disponemos sobre conocimiento en sorgo dulce, son de ANCAP en el establecimiento Joanicó 1955-56 (Canelones). Luego Calnu inició estudios en sorgo dulce con miras a la producción de azúcar y etanol en 1975-76 por el profesor Ing. Agr. Dr. Evaristo Lazo. Bella Unión ya tenía 40 años de experiencia en producción de azúcar de caña. Las experiencias iniciales en sorgo dulce fueron alentadoras, con producciones máximas de 40 ton/ha de tallos y 2.000 Kg/ha de grano. Los problemas principales fueron durante el período germinación, emergencia e instalación del cultivo (4 – 6 semanas); con dificultades por exceso de humedad en suelos de permeabilidad lenta, así como condiciones adversas por sequías en el mismo período fenológico. Se observaron ataques de la plaga *Diatraea saccharalis* (Borer, taladro de la caña de azúcar) y ‘mosquita’ del sorgo en la panoja.

Las características climáticas y de suelos para el cultivo de sorgo, en general, se consideran buenas en Uruguay. El clima en Bella Unión presenta un período de 9 meses, de setiembre a mayo, con temperaturas medias superiores a 15 °C y prácticamente libre de heladas. Estas condiciones aseguran un ciclo fenológico completo, ade-

más de la oportunidad del aprovechar rebrotes para alimentación animal.

Las lluvias son relativamente más abundantes en primavera-verano durante el ciclo productivo del sorgo dulce, aunque por su errática distribución es necesario contar con la posibilidad de regar para lograr producciones altas y estables.

La luminosidad del período octubre – marzo supera las 250 horas/mes, por lo que son adecuadas y coinciden con el ciclo de mayores exigencias del cultivo de sorgo.

Los suelos de la zona de influencia de ALUR fueron estudiados en 1976 (Agrosuelos Consultores), de donde se extraen las posibilidades del cultivo en áreas circundantes al cultivo de caña de azúcar, con algunas limitantes subsanables con mejoras en el manejo, riego y drenaje.

Los antecedentes de producciones de sorgos dulces en alrededores de Bella Unión no son muy abundantes, existen algunos antecedentes de sorgos forrajeros azucarados para ensilajes. En cambio existen numerosos antecedentes de producción forrajera y de granos en la zona litoral de Paysandú, Río Negro, Soriano y Colonia. En cultivos bien manejados de sorgo granífero se logran producciones de 50 a 70 ton/ha de forraje verde o 4-6 ton/ha de grano.

Entre los cultivares de sorgo dulce ensayados en Calnu se encuentran las variedades Brawley, Collier, Dale, Theis, Willey, Wray y dos híbridos 4315x5134 y 4317x5858 (informe interno Calnu, Ing. Agr. Julio Silva).

Informes industriales de Calnu (Ings. Quim. M. Vidal, Héctor Crescionini, 1982) hablan de las malas condiciones de cosecha por lluvias, no obstante “El sorgo (dulce) no parece ofrecer dificultades para su molienda, no se observaron anomalías destacables y el bagazo resultante es un buen combustible, con un comportamiento en calderas similar al bagazo de caña” también valoran la humedad de la fibra. La molienda en sí, no ofreció problemas, incluso la *Pol* de bagazo fue muy baja. Los problemas industriales se ubicaron en el estado de madurez avanzada del sorgo dulce al momento de la cosecha y el rápido deterioro del jugo, aún en los tiempos relativamente cortos del estacionamiento sobre el ‘canchón’ de fábrica.

Los datos obtenidos en 1976 arrojaron los resultados siguientes (Cuadro 2).

**Cuadro 2. Información industrial y características de sorgo dulce (datos de 1976)**

Fecha de Muestreo	Jugo %	Brix %	Pol %	Pureza %	Sacarosa %	Reductores %	Fibra %
Marzo, 3	23	15,6	8,75	56,08	8,88	3,67	15,4
Marzo, 19	23	14,2	7,96	56	8,14	3,13	16,2
Marzo, 27	1,2	16,9	9,33	55,2	8,92	4,12	-
Marzo, 30	-	18	9,88	54,88	-	3,91	-
Abril, 4 (*)	-	17,1	11,04	64,56	11,69	2,33	-
Abril, 21 (*)	21,2	19,6	13,58	69,28	13,99	2,03	-

(\*) Tallos sin panojas.

Bx: Brix. Medida de solutos disueltos.

Pol: Es una medida del contenido de sacarosa.

ART: Azúcares Reductores Totales.

RED: Reductores

Jugo Prensa: Es el jugo que se extrae por efecto de prensado.

Fosfato: Es un componente necesario para la clarificación del jugo.

Almidón: Compuesto que dificulta la sacarificación.

La composición del producido a campo, sobre la superficie del suelo para tres variedades se representa en el Cuadro 3.

**Cuadro 3. Proporción sobre el suelo de sorgo dulce (datos de 1976)**

Variedad	Tallos %	Hojas %	Despunte (*) %
Río	64,1	22,8	13,1
Roma	60,8	23	16,2
Ramada	71,2	15	13,7

(\*) Incluye panoja

Por su parte el desglose del componente despunte se observa en el Cuadro 4.

**Cuadro 4. Desglose del despunte en sorgo dulce (datos de 1976)**

Variedad	Peso de grano % de panoja	Peso de grano % de planta entera.
Río	76,9	10,07
Roma	55	8,91
Ramada	71,4	9,78

Finalmente la producción estimada de grano seco por variedad resultante se representa en el Cuadro 5.

**Cuadro 5.** Rendimiento estimado de grano en sorgo dulce (datos de 1976)

Variedad	Grano Kg/ha
Río	1530
Roma	1738(*)
Ramada	2060

(\*) Afectada por pájaros

El seguimiento de maduración (Brix, Pureza, Sacarosa y Azúcares totales) de estas variedades arrojó ciclos entre 130 – 140 días desde la siembra, se mantenían en la planta durante 4-5 semanas según la temperatura ambiente (informe interno Calnu, Ing. Agr. F. Stanham, 1981).

Desde la siembra al estado de madurez de grano lechoso – masa blanda, fueron 116 días para las tres variedades en fecha de siembra 17 de octubre. Con fecha de siembra 14 de noviembre se obtuvieron condiciones de cosecha a los 103 días desde la siembra.

Los rendimientos promedios en este ciclo fueron de 33 ton /ha de tallos con un coeficiente de variación de 16 %. Las diferencias entre tratamientos regados y secano fue del orden de 9 ton/ha sin significación estadística, no obstante hay que considerar variaciones experimentales importantes.

En 2006 ALUR retoma la actividad experimental en sorgo dulce, con objetivos definidos de producir alcohol anhidro para complementar el ciclo industrial de la caña de azúcar. El área de diversificación de combustibles de ANCAP, encara la producción de etanol hasta el nivel del 8 % de todas las naftas de Uruguay, con caña de azúcar y sorgo dulce en esta primera fase.

Se realizan ensayos parcelarios en varios sitios del área cañera (ALUR, Facultad de Agronomía,

Informes Ings. Agrs. D. Oxandabarat, F. Hackembruch, D. Macías, 2006-2009). Se lograron rendimientos de campo mayores a 50 ton/ha de tallos industrializables. Se mantienen las restricciones de los inicios del ciclo, variabilidad en los resultados en varios casos mayores al 20 % del coeficiente de variación. Se vuelven a recoger los problemas de excesos de agua en las etapas iniciales del cultivo así como sequías, produciendo poblaciones irregulares de plantas. Los ensayos se corrigen por número de plantas, pero el problema en la producción comercial se mantiene.

Se repite la experiencia en 2009 en un campo comercial alejado del área cañera, abarcando otras zonas potenciales. Se siembra en el establecimiento Itacumbú, próximo a la localidad de Baltasar Brum, Artigas a 50 km del ingenio. Se repiten algunas de las variedades ensayadas en los años 2006-2008, M81-e y Theis. Se recogen las mismas experiencias negativas de los excesos de lluvia en los períodos iniciales de establecimiento del cultivo. La situación de plagas especialmente *Diatraea saccharalis* reaparece, la que se controla con métodos biológicos y químicos. INIA, ANCAP y ALUR se encuentran en proceso de firmar un acuerdo de cooperación técnica, donde se incluyen una serie de actividades de investigación agrícola e industrial con caña de azúcar y sorgo dulce.

A mediados de abril comenzó la experiencia de cosecha mecanizada. Fueron muy positivas tanto corte, carga, traslado, descarga y la parte mecánica del estacionamiento en el canchón con caña trozada. Se verifica nuevamente la velocidad del deterioro del jugo luego del corte.

El proceso industrial hasta la producción de melado (jarabe) de Brix 83% se realizó sin mayores dificultades lográndose un producto similar al de caña de azúcar con un aroma frutado agradable (cuadro 6).

Se preparan en este momento los procedimientos industriales para la elaboración etanol anhidro.

**Cuadro 6.** Resultados de análisis industriales de sorgo dulce, cultivo 2009-2010 (presentación interna de ALUR, Ing. Químico. Walter Bisio)

FECHA	% Bx	% POL	% ART	% RED	% FIBRA	% JUGO PRENSA	FOSFATO (ppm)	ALMIDON (ppm/Bx)
16/03/10	10,17	1	8,752	7,219	12,4	75,32	288	7518
30/03/10	10,99	2,16	9,422	6,381	13,81	75,58	270	5645
08/04/10	14,17	5,67	13,573	8,5	15,33	69,89	286	8517
13/04/10	15,65	6,42	15,294	7,774	12,74	75,64	178	11216
16/04/10	13,36	6,55	12,576	4,862	14,4	74,11	466	14389
22/04/10	14,6	8,3	13,558	4,845	14,55	73,24	47	19555
28/04/10	15,11	7,78	14,545	5,478	14,65	72,88	41	18716
07/05/10	14,89	6,98	14,626	6,221	14,78	73,32	....	
21/05/10	12,08	5	11,29	4,745	12,09	76,2	53	10150

Bx: Brix. Medida de solutos disueltos.

Pol: Es una medida del contenido de sacarosa.

ART: Azúcares Reductores Totales.

RED: Reductores

Jugo Prensa: Es el jugo que se extrae por efecto de prensado.

Fosfato: Es un componente necesario para la clarificación del jugo.

Almidón: Compuesto que dificulta la sacarificación.

## Sustitución de gasoil por etanol predial

El enfoque es producir una fuente de energía alternativa y renovable. La aplicación deberá estar regida por leyes y normas del Estado uruguayo. En este momento el Gobierno está incentivando la producción de energía renovable a todos los niveles, hasta familiares en hogares uruguayos. El uso de alcohol está legislado para mezclar con las naftas por parte de ANCAP. El mundo dispone de antecedentes con valores de balance energético con caña de azúcar en la producción de etanol en el orden de 0.9 - 1.8 (Hopkinson Jr. y Day Jr., 1980).

A título de opción, decimos que el etanol predial es hidratado y son necesarios algunos cambios en los motores de riego. En motores de combustión ciclo Otto prácticamente tal como están pueden funcionar con pequeños cambios, sobre todo de protección de tuberías, bomba y tanque de nafta. En el mercado brasileño se venden Kits por USD 200. Las modificaciones del motor Diesel son mayores ya que hay que volverlos al encendido eléctrico. Los *Kits* se ofrecen por valores cercanos a USD 10.000. Existen firmas que producen motores modificados.

**Cuadro 7.** Consumos de gasoil en sistemas de riego de caña de azúcar

Productor	Area ha	Producción Caña Ton	Consumo Gasoil. Litro	Energía Gasoil MJ (*)
1	18,5	1298,18	5192,25	202497,75
2	53	3996	13702	534378
3	15	614	2160	84240
4	119	7972,5	2082	81198
5	12	339,14	2328	90792
6	32,5	2155	15341	598299
7	163	10700	2934	114426
8	95	7790	29919	1166841

(\*) Gasoil: 39 MJ/litro (Sagardoy Alonso, J.A., 2003)

Las 119.2 ha se procesan en una microdestilería trabajando con el producido en 6 unidades de 20 ha por espacio de 4 días entre 'bachas' incluyendo 48 horas de fermentación (Cuadro 8).

**Cuadro 8.** Estimación de consumo de etanol (EtOH) en los sistemas de riego.

Productor	Area ha	Producción Caña Ton	Consumo Gasoil. Litro	EtOH Litro	Area S. Dulce ha
1	18,5	1298,18	5192,25	9551,6	8,5
2	53	3996	13702	25206,03	22,4
3	15	614	2160	3973,51	3,5
4	119	7972,5	2082	3830,02	3,4
5	12	339,14	2328	2961,74	2,6
6	32,5	2155	15341	28221,12	25,1
7	163	10700	2934	5397,35	4,8
8	95	7790	29919	55038,63	48,9
	-----	-----	-----	-----	-----
Totales	508	34864,64	73658,25	134180	119,2

El modelo ejemplo que se describe a continuación, es a los efectos de mostrar la metodología para la estimación del área de sorgo dulce a cultivar y procesar, hasta obtener etanol en una microdestilería. Con la información de la demanda de gasoil se estiman los requerimientos de etanol. Se considera que una tonelada de caña produce 6625 MJ (Alonso-Pippo et al., 2009) y el etanol tiene un contenido del 54.36 % (Leopold Center Progress Report, 1995) de la energía del gasoil.

Las 119.2 ha se procesan en una microdestilería trabajando con el producido en 6 unidades de 20 ha por espacio de 4 días entre 'bachas' incluyendo 48 horas de fermentación (Cuadro 8).

Resultó, que por cada 4.5 ha de caña de azúcar aproximadamente, se necesita 1 ha de sorgo dulce para producir etanol y abastecer de alcohol a los sistemas de bombeo. En el área de abastecedores de caña de azúcar de Alur, hay unas 5.500 ha cubiertas por sistemas de riego multiprediales con levantes electrificados. Se expandirá el área a 12.000 ha para alcanzar 10.000 ha de molienda anual (20 % reimplante anual) a fin de abastecer el programa de defensa agroalimenta-

ria de azúcar y producir etanol para las mezclas de ANCAP con nafta, hasta del 8 %. Esto arroja en números groseros, en el orden de 6.000 ha (es un máximo teórico) bajo sistemas de riego a gasoil, resultando la necesidad de 1.400 ha de sorgo dulce industrializable, para la producción de etanol apoyando la sostenibilidad energética al sistema de producción de caña de azúcar.

Esta metodología se puede aplicar no sólo a los sistemas de bombeo de riego sino a toda la demanda de combustible líquido, en otros componentes de la tecnología de la producción agropecuaria predial.

#### **Agradecimientos:**

Sra. Lourdes Parentini  
 Sr. Ramón Bonilla  
 Sr. Francisco Muñoz  
 Ing. Agr. José María Rodríguez  
 Ing. Agr. Fernando Hackenbruch  
 Ing. Agr. Hugo Bittencourt  
 Ing. Qca. Elena Kurc  
 Ing. Qco. Walter Bisio  
 Eng°. Eduardo Cauduro Mallmann



# 12. Estrategias para la incorporación del riego en sistemas de producción extensivos

C. García

Claudio García: Programa de Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA Las Brujas, Uruguay  
Contacto: [cgarcia@inia.org.uy](mailto:cgarcia@inia.org.uy)

## 12.1. Introducción

En los últimos 5 años se ha dado en Uruguay un importante incremento del área de cultivos extensivos (maíz, soja, sorgo, pasturas) bajo riego. Probablemente, una de las causas ha sido la marcada variación climática, que incrementó la probabilidad de fracasos y bajos rendimientos en los cultivos. Asimismo, se ha dado una intensificación de la producción con un aumento de las necesidades de agua por unidad de área, ya que la tierra es probablemente el factor más limitante para el crecimiento del área productiva en el presente.

Los sistemas productivos más expresivos (tanto en área, como en intensidad de uso) con mayor potencial para adquirir la herramienta tecnológica del riego son la lechería, la agricultura y, en menor medida, la pecuaria.

La incorporación del riego como medida de atender las demandas hídricas en aquellos períodos que los registros de lluvias son escasos, ha permitido tener por un lado, áreas con altas tasas de producción de materia seca; y por otro, áreas de producción de grano o reservas que permiten disminuir los riesgos climáticos.

El riego suplementario aplicado a cultivos agrícolas y forrajeros debe ser concebido como una herramienta tecnológica, no sólo útil para atenuar la falta de lluvias en períodos, a veces breves, (que generalmente ocurren en nuestro país); pero críticos, en cuanto a sus efectos sobre la estabilidad, sino también como un elemento de planificación e incorporación al área total en producción, ya que permite dar estabilidad e incrementar la productividad del sistema.

El objetivo del trabajo es presentar algunos resultados obtenidos en predios comerciales (lecheros y agrícola-ganaderos) en los que la incorporación del riego al sistema de producción, permitió la estabilización y mejora de todo el sistema productivo del predio.

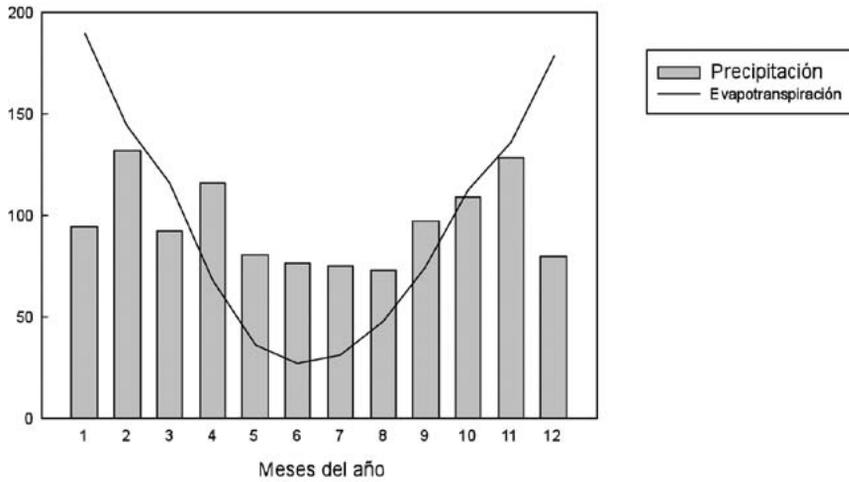
## 12.2. Marco conceptual

### Caracterización agroclimática

De acuerdo a los registros históricos de los últimos 30 años de las diferentes Estaciones Agroclimáticas de INIA (<http://www.inia.org.uy/gras>), se produce un déficit hídrico promedio entre los meses de octubre y marzo de 180 a 240 mm, dependiendo de la estación agroclimática y de los años de registros completos que cada una de ellas tiene. Este cálculo de balance simple fue realizado tomando como entrada las precipitaciones promedio mensuales y como salida, la evapotranspiración de referencia, estimada a partir de la ecuación de Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

A modo de ejemplo, se presenta en la Figura 1, un balance simple entre las precipitaciones y la evapotranspiración de referencia de la estación meteorológica ubicada en la Estación Experimental “Wilson Ferreira Aldunate” - INIA Las Brujas.

**Figura 1:** Precipitación y evapotranspiración media mensual. Período 1973-2005. INIA Las Brujas.

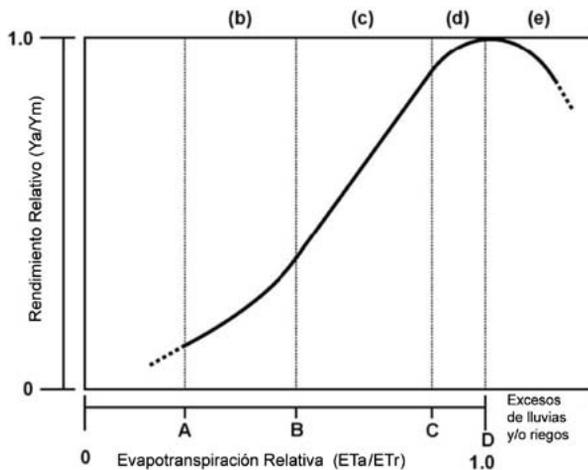


Los efectos negativos del déficit hídrico pueden verse agravados por el momento de ocurrencia y la duración en días del mismo, y por el estado fenológico del cultivo al momento del déficit.

La función de producción de agua de un cultivo, se expresa con la relación entre el rendimiento y el agua evapotranspirada por el cultivo, puede ser representada como se muestra en la Figura 2. Según la zona de la curva en que ocurra un exceso o déficit de agua, tanto mayor será el perjuicio en la producción de ese cultivo.

Según Denmead and Shaw (1962), cuando una planta en crecimiento tiene tasas de transpiración media diarias entre 3 a 4 mm día<sup>-1</sup>, la misma se ve afectada cuando el potencial de succión de agua en el suelo es de 2 bar. Con tasas de transpiración altas (6 a 7 mm día<sup>-1</sup>), la misma es afectada con tensiones de succión de 0.3 bar. Con tasas de transpiración bajas (1 a 2 mm día<sup>-1</sup>), la misma no se ve afectada con potenciales de tensión de succión en el suelo de 12 bar. Es decir entonces, que se debe tener especial cuidado

**Figura 2:** Función de producción de agua de un cultivo expresada como la relación entre la evapotranspiración relativa y el rendimiento relativo (Geerts and Raes, 2009).



en la capacidad de almacenamiento de agua del suelo a diferentes potenciales de succión.

En general en climas húmedos, donde hay probabilidad de eventos de precipitaciones, el efecto negativo de un déficit de agua afecta más severamente a un cultivo de grano que a uno forrajero que generalmente se maneja con cortes.

En resumen entonces, si solamente se toma como criterio de manejo del riego las variables agroclimáticas que gobiernan la demanda de agua de los cultivos, se podría en algunos casos regar por encima de las necesidades del cultivo y en otros casos, el agua no sería suficiente para satisfacer las demandas atmosféricas.

### Caracterización edáfica y su variabilidad

Los suelos donde se realiza agricultura de secano en nuestro país son en general de fertilidad alta, profundos, y con buenas condiciones físico-hídricas tanto del punto de vista de su infiltración como de su capacidad de almacenamiento de agua en el perfil.

En el caso de las pasturas, las mismas son realizadas sobre ambientes edáficos más variables. El supuesto *a priori* es que los cultivos y pasturas bajo riego se producen en aquellas situaciones donde los suelos tienen mayor potencial de producción. Sin embargo, los relevamientos de suelos realizados en predios donde la práctica del riego en cultivos y/o forrajeras es frecuente,

muestran que hay una diversidad muy importante en las características de esos suelos.

En la Tabla 1 se presentan resultados de la tasa de infiltración básica e infiltración acumulada en diferentes sitios relevados en el país.

A la variabilidad en los valores de infiltración de agua en el suelo dentro de una misma unidad de suelo, se agrega la variabilidad en la capacidad de almacenamiento de agua total del perfil de los suelos. La Tabla 2 muestra para esos mismos sitios el máximo contenido de agua que puede retener el suelo, el contenido de agua con potenciales de succión de 15 bar, y el agua almacenada a 60 cm de profundidad.

Los datos presentados en las Tablas 1 y 2 dejan en claro por una parte la necesidad de caracterizar los suelos donde se van a realizar los cultivos bajo riego, de modo de definir el manejo más adecuado a las condiciones físicas del suelo. Por otro lado, el manejo del riego basado solamente en el umbral de agotamiento del perfil no es lo más adecuado por la variabilidad que presentan las características físico hídricas del suelo.

Los datos reportados por Deanmead and Shaw (1960) muestran que a medida que el suelo se seca, la tasa de transpiración va disminuyendo, mientras que con contenidos de agua mayores, la tasa de transpiración aumenta. Según el tipo de suelo ese contenido de humedad va a variar, pero además, en función de los datos presentados, dentro de una misma unidad de clasifica-

**Tabla 1.** Tasa de infiltración básica e infiltración acumulada en 8 sitios relevados de Uruguay (Unidad de Suelos 1:1.000.000, Ecilda Paullier-Las Brujas)

Nº sitio	Infiltración básica	Infiltración acumulada	Capacidad de infiltración (mm h <sup>-1</sup> )
1	$i=0.7089 \text{ t}-0.3897$	$I=0.7089 ( \text{t}0.6103)/(0.6103)$	5
2	$i=0.9795 \text{ t}-0.4109$	$I=0.9795 ( \text{t}0.5891)/(0.5891)$	2
3	$i=4.8796 \text{ t}-0.5184$	$I=4.8796 ( \text{t}0.4816)/(0.4816)$	15
4	$i=0.0740 \text{ t}-0.1077$	$I=0.0740 ( \text{t}0.8923)/(0.8923)$	0.5
5	$i=0.2561 \text{ t}-0.3131$	$I=0.2561 ( \text{t}0.6869)/(0.6869)$	2.3
6	$i=1.3496 \text{ t}-0.3156$	$I=1.3496 ( \text{t}0.6844)/(0.6844)$	12
7	$i=0.9081 \text{ t}-0.2357$	$I=0.9081 ( \text{t}0.7643)/(0.7643)$	13
8	$i=6.5596 \text{ t}-0.4649$	$I=(6.5596 ( \text{t}0.5351))/(0.5351)$	27

**Tabla 2.** Densidad de suelo, contenido de agua a saturación, contenido de agua a 15 bar y el agua total almacenada a 60 cm de profundidad de 8 sitios relevados de Uruguay (Unidad de Suelos 1:1.000.000, Ecilda Paullier-Las Brujas).

Nº sitio	Densidad de suelo	Humedad volumétrica a 0 bar (m-3 m-3)	Humedad volumétrica a 15 bar (m-3 m-3)	Agua total almacenada 0-60 cm (mm)
1	1.27	0.4130	0.2790	80.4
2	1.21	0.3956	0.2883	60.4
3	1.35	0.4156	0.3375	46.9
4	1.22	0.5099	0.4199	54.0
5	1.26	0.4210	0.3020	71.4
6	1.28	0.3903	0.2853	63.0
7	1.37	0.3419	0.2490	55.7
8	1.40	0.4220	0.3130	65.4

ción, también existe importante variabilidad, que determina que se deba abordar el manejo de riego integrando las dos variables: suelo y clima.

En función de lo expuesto, en los estudios de casos de sistemas productivos que se han realizado en estos últimos años en INIA, se ha explorado el manejo del riego integrando la planta con las dos variables mencionadas (suelo y clima). Los datos presentados no son resultados de trabajos de investigación, por lo tanto el objetivo es esbozar conceptualmente la interrelación que existe entre el suelo, la planta y la demanda atmosférica.

### 12.3. Estrategias de riego en cultivos extensivos

La incorporación del riego a nivel comercial se ha dado principalmente en el cultivo de maíz, donde mejor se conoce la respuesta al agregado de agua. Si bien era aceptable el desarrollo y productividad del cultivo en seco, principalmente en la producción lechera, la introducción de híbridos de alto potencial productivo y la ocurrencia de 3 veranos consecutivos con déficit hídricos muy marcados, llevaron rápidamente a los productores a incorporar la tecnología del riego.

En general, dentro del sistema productivo predial no ocupa un área muy importante, pero la producción bajo riego ha permitido alcanzar rendimientos altos (promedio de 10.000 kg ha-1

y estables a través de los años. Ello determina que aunque el área bajo riego no sea muy significativa en extensión, el aporte de alimento de la misma al sistema hace que tenga una relevancia jerarquizada en el predio.

Resultados nacionales sobre esta práctica en las últimas cuatro zafas (2006-2010), se presentan en la Tabla 3.

En general esto resulta en una reserva de forraje (silo) que es muy bien aprovechado en el tambero durante un período bastante prolongado de tiempo durante el otoño-invierno. En el caso de los sistemas agrícolas ganaderos el riego ha sido una muy adecuada herramienta para afianzar los sistemas de encierro 'feed lot' al contar el sistema de producción con áreas reducidas (en relación al área ocupada del total) pero con altas producciones de grano y forraje.

Los datos de la Tabla 3 muestran las variaciones marcadas que existieron en los diferentes años en cuanto a las condiciones de demanda del cultivo, los períodos de crecimiento del mismo y más aún, la variabilidad en las precipitaciones. Sin embargo, se mantuvo un alto nivel de producción de grano a través de los cuatro años, en promedio por encima de los 10.000 kg ha-1 año-1.

Los métodos de riego utilizados en los sitios relevados fueron aspersión (convencional y pivot central) y por superficie (riego por fajas o

**Tabla 3.** Resultados de producción de maíz (grano) bajo riego, la lámina aplicada y las lluvias registradas en nueve sitios del Uruguay.

Nº sitio	Período de cultivo	Rendimiento de grano de maíz (kg ha <sup>-1</sup> )	Lámina de riego aplicada (mm)	Precipitaciones registradas (mm)	Evapotranspiración del cultivo (PenmanMonteith) (mm)
1	08-10-2006 al 24-01-2007	10190	172	456	352
2	04-11-2007 al 28-02-2008	8500	439	280	540
3	14-11-2007 al 01-03-2008	10300	306	156	396
4	04-11-2007 al 02-03-2008	9200	380	171	423
5	15-09-2008 al 01-03-2009	10500	600	292	572
6	24-09-2008 al 23-01-2009	13100	420	100	408
7	19-09-2008 al 01-02-2009	9400	512	119	517
8	18-12-2009 al 30-03-2010	10636	154	728	391
9	4-12-2009 al 29-03-2010	11000	194	728	434

**Tabla 4.** Resultados de producción de materia seca de sorgo forrajero (sudangrás) bajo riego, la lámina aplicada y las lluvias registradas en distintos sitios del Uruguay.

Nº sitio	Período de cultivo	Rendimiento de materia seca de sudan (kg ha <sup>-1</sup> )	Lámina de riego aplicada (mm)	Precipitaciones registradas (mm)	Evapotranspiración del cultivo (PenmanMonteith) (mm)
1	12-11-2007 al 23-03-2008	32000	230	130	392
2	20-11-2007 al 01-05-2008	33570	235	179	349
3	19-11-2007 al 01-04-2008	32000	210	250	352
4	10-12-2007 al 20-03-2008	27600	160	126	298
5	23-10-2008 al 20-03-2009	37000	292	370	392

melgas); pero es de destacar que, independientemente del método de riego utilizado, en todas las situaciones el criterio de manejo del agua se basó en reponer una lámina de riego acorde a las necesidades del cultivo, y teniendo en cuenta en cada caso la capacidad de almacenamiento total de agua en el perfil del suelo.

Se realizaron también relevamientos en sorgo forrajero (*sudangrás*) en diferentes situaciones de producción en dos zafras. Los resultados fueron similares en cuanto a los altos rendimientos por el aporte complementario del agua y en particular, por la estabilidad que permite esta herramienta tecnológica (Tabla 4)

El rendimiento presentado en la Tabla 4 es el resultado de la evaluación en cuatro o cinco pastoreos realizados durante el ciclo de crecimiento del cultivo. En todos los casos son áreas de entre

5 y 7 ha, donde, dependiendo de la disponibilidad de forraje en cada pastoreo, se aplicaron cargas instantáneas de 10 a 12 vacas en ordeño en promedio.

Los métodos de riego utilizados en el sorgo fueron por aspersión convencional, destacándose al igual que en el caso del maíz, en las diferentes situaciones el criterio de manejo del agua basado en reponer una lámina de riego acorde a las necesidades del cultivo, y teniendo en cuenta en cada caso la capacidad de almacenamiento total de agua en el perfil del suelo.

Las situaciones de producción de sorgo forrajero y maíz bajo riego evaluadas, determinan igualmente que no son necesarias grandes áreas bajo riego, pues tanto el aporte de producción de materia seca en forraje que se ofrece o la producción de grano o silo para alimentación pos-

terior son muy altos cuando se intensifican los factores de producción y se realiza un correcto manejo del agua y la fertilización.

## 12.4. Estrategias de riego en pasturas

En el caso de pasturas, los relevamientos de producción bajo riego están acotados al cultivo de alfalfa, y también se ha observado una alta respuesta en producción de materia seca al agregado de agua (Tabla 5).

Para la alfalfa el comienzo del riego en la temporada se atrasa algo en relación a los cultivos analizados anteriormente y a la vez, las láminas aplicadas son en general, menores. Esto es debido básicamente a dos razones: por un lado se retrasa a efectos de no saturar el suelo y permitir mayor oxigenación para las raíces ante la eventualidad de una lluvia. Por otro lado, las láminas pequeñas (no mayores a 25 mm) aseguran, en los suelos con problemas de drenaje, que el stress radicular por falta de oxígeno sea mínimo.

Si bien el potencial de rendimiento de la alfalfa bajo riego es mayor que los presentados en la Tabla 5, estos fueron obtenidos en cinco a seis cortes por año. En algunas situaciones, los rendimientos mermaron debido a la ocurrencia de precipitaciones de intensidad media a alta en el verano; si bien las lluvias en general fueron escasas durante las zafas relevadas.

El método de riego utilizado en ambas situaciones fue aspersión convencional y las áreas variaron según los años entre 10 a 15 ha, soportando por momentos cargas instantáneas de más de 15 animales adultos por hectárea.

## 12.5. Conclusiones

De acuerdo a los bancos de datos agroclimáticos de las estaciones meteorológicas de INIA en el país, siempre se da un déficit hídrico de 180 a 240 mm durante los meses de primavera-verano.

Existen períodos cortos de tiempo (7 a 10 días) sin precipitaciones que, en coincidencia con determinados momentos del ciclo de desarrollo del cultivo, afectan de manera significativa la producción.

Aún con déficit hídricos en períodos cortos no permiten alcanzar el potencial o la producción de materia seca y granos esperada; lo que hace que la planificación del establecimiento se vea afectada en mayor o menor medida.

Realizar el manejo del riego teniendo en cuenta las variables de clima, suelo y planta aumentan la probabilidad de una mejor respuesta vegetal al agregado de agua.

Dependiendo de las características de cada sistema de producción, es recomendable tener un área de 5 al 10% del predio donde se realicen los cultivos bajo riego como un “seguro de producción”.

Investigaciones futuras deberían determinar cuáles serán las especies a ser regadas así como cuantificar la producción bajo riego integrando los factores de planta, suelo y clima. Asimismo determinar la superficie del predio que habría que dedicar a manejar bajo riego para mantener un sistema con buenos índices productivos y estables en el tiempo.

**Tabla 5.** Resultados de producción de materia seca de alfalfa bajo riego la lámina aplicada y las lluvias registradas en dos sitios del Uruguay.

Nº sitio	Período de cultivo	Rendimiento de materia seca de alfalfa (kg ha <sup>-1</sup> )	Lámina de riego aplicada (mm)	Precipitaciones registradas (mm)	Evapotranspiración del cultivo (Penman-Monteith) (mm)
1	10-10-2006 al 23-03-2007	15200	210	298	551
2	02-10-2007 al 01-03-2007	17300	250	392	491
3	19-10-2007 al 01-03-2008	17800	270	250	523
4	10-10-2008 al 20-03-2009	18200	295	126	568

# 13. Riego Suplementario en pasturas: antecedentes de investigación nacional

*J. Sawchik, C. Mas, E. Pérez Gomar, R. Bermúdez, V. Pravia, D. Giorello, W. Ayala*

Jorge Sawchik. INIA La Estanzuela, Uruguay.

Contacto: [jsawchik@inia.org.uy](mailto:jsawchik@inia.org.uy)

Carlos Mas. ex Técnico INIA, Uruguay.

Contacto: [cmas123@gmail.com](mailto:cmas123@gmail.com)

Enrique Pérez Gomar. INIA Tacuarembó, Uruguay.

Contacto: [eperezgomar@inia.org.uy](mailto:eperezgomar@inia.org.uy)

Raúl Bermúdez. INIA Treinta y Tres, Uruguay.

Contacto: [rbermudez@inia.org.uy](mailto:rbermudez@inia.org.uy)

Virginia Pravia. INIA Treinta y Tres, Uruguay.

Contacto: [vpravia@inia.org.uy](mailto:vpravia@inia.org.uy)

Diego Giorello. INIA Tacuarembó, Uruguay.

Contacto: [dgiorello@inia.org.uy](mailto:dgiorello@inia.org.uy)

Walter Ayala INIA Treinta y Tres, Uruguay.

Contacto: [wayala@inia.org.uy](mailto:wayala@inia.org.uy)

## 13.1. Introducción

El potencial de los sistemas de producción agropecuarios de nuestro país es altamente dependiente del régimen de precipitaciones. Durante el verano, y en condiciones promedio, el contenido de agua disponible de los suelos no satisface la demanda de los cultivos y pasturas. Así se verifican frecuentemente impactos negativos en la producción de cultivos anuales y perennes. La capacidad de almacenaje de agua de nuestros suelos oscila entre 60-180 mm de agua disponible, lo cual representa en el mejor de los casos, 1/3 de las necesidades de agua de un cultivo de maíz de alto potencial o el 50% de aporte para la persistencia y/o producción de materia seca en cantidad y calidad de algunas forrajeras utilizadas en nuestros sistemas de producción. Por tanto, existe una alta dependencia de la recarga hídrica del suelo, tanto del momento como de su magnitud, para satisfacer las demandas de los cultivos y pasturas.

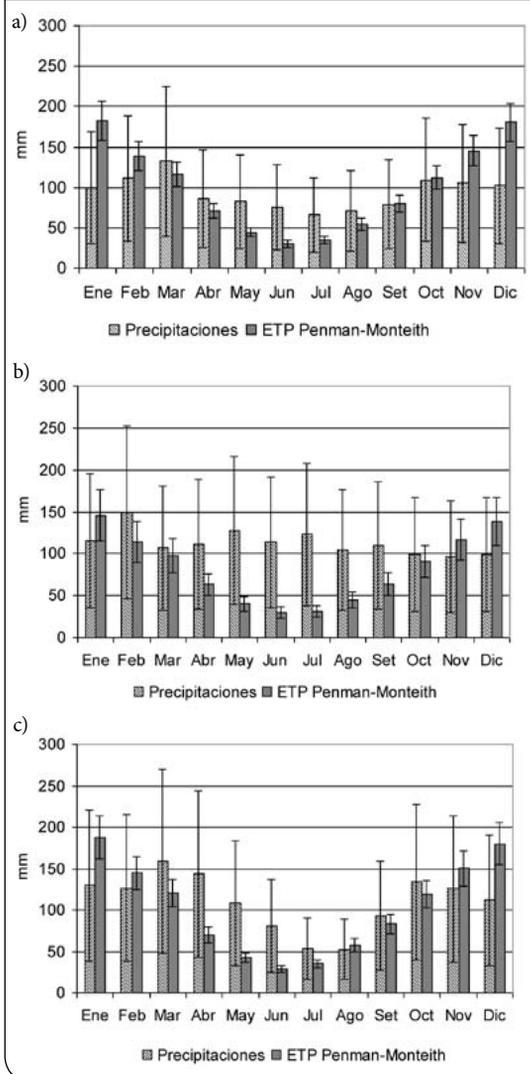
La variabilidad interanual del clima está integrada a los diferentes sistemas de producción agropecuarios. Sin embargo, existen una serie de factores que en los últimos años han llevado a poner más atención en el riesgo asociado a la variabilidad climática. Por un lado se constata una mayor frecuencia de eventos extremos, tanto por la incidencia del cambio climático, así como por la identificación de variaciones interdecádicas en las precipitaciones. Por otro lado,

el país asiste a un escenario de intensificación de la producción con un aumento de las necesidades de agua por unidad de área. Esto último es resultado de una alta presión y competencia entre rubros por el uso de la tierra. Así en algunos sistemas de producción, los productores tienen serias limitantes para crecer en área lo que implica una mejora en el diseño y cumplimiento de sus rotaciones agrícola-forrajeras para mantener una alta eficiencia en la producción.

Bajo este escenario, los eventos de déficit hídrico impactan muy fuertemente sobre el ingreso y la estructura de la unidad de producción encareciendo y aumentando la variabilidad de los costos de alimentación. Este escenario de creciente variabilidad climática con predicciones de aumento de la temperatura media del aire, y en consecuencia de la demanda atmosférica, y la necesidad de potenciar y/o estabilizar la capacidad productiva de nuestros sistemas hace necesario diseñar y/o utilizar herramientas de uso y manejo del agua que atenúen los riesgos y ayuden a estabilizar o incluso aumentar la producción.

El riego suplementario aplicado a cultivos agrícolas y forrajeros puede ser una estrategia poderosa no sólo para atenuar las crisis en años de sequía sino fundamentalmente para estabilizar e incrementar la producción por unidad de superficie. La elección de la estrategia más adecuada debe realizarse en forma integral de forma de conside-

**Figura 1.** Evapotranspiración y precipitaciones promedio (serie 1970-2008) registradas en tres estaciones experimentales de INIA, ubicadas en diferentes regiones de Uruguay: a. INIA La Estanzuela (Litoral Sur), b. INIA Treinta y Tres (Este), c. INIA Salto Grande (Norte).



rar aspectos como el diseño del sistema de producción, los diferentes escenarios climáticos y de precios. El presente artículo tiene el objetivo de revisar la información generada en el país en riego suplementario de pasturas y establecer nuevos focos para guiar la investigación a futuro.

### Caracterización agroclimática por región

En Uruguay las precipitaciones ocurridas durante la época estival no satisfacen la demanda atmosférica en el promedio de los años. La de-

manda atmosférica presenta una marcada estacionalidad, con mayor demanda en la época estival en comparación con la época invernal. En cambio, la ocurrencia de precipitaciones tiene un comportamiento promedio similar durante todas las estaciones del año. Esto resulta en un balance negativo durante los meses de verano. Si bien esto se cumple en términos generales para todo el territorio nacional, existe cierta variación entre zonas que debe tenerse en cuenta. En la figura 1 se presenta la evapotranspiración de referencia calculada para tres estaciones experimentales de INIA ubicadas en diferentes zonas geográficas.

En la serie climática registrada en INIA Treinta y Tres, la demanda atmosférica promedio en los meses de enero y febrero no supera valores de 150 mm mensuales, mientras que en las estaciones ubicadas en el Litoral Sur y Norte, más alejados de la influencia costera, se registran mayores valores promedio. Las propiedades del suelo de cada sitio, junto con estas características climáticas específicas de cada zona, pueden determinar diferentes necesidades de riego y diferentes niveles de respuesta al riego suplementario para cada zona.

## 13.2. Región Litoral Sur

### Experimentos con leguminosas y riego para producción de forraje

A diferencia de otras producciones o rubros, la investigación en riego de pasturas ha sido escasa y discontinua en el país. Buena parte de los esfuerzos en la investigación desarrollada en el Litoral Sur se colocó en leguminosas de clima templado para producción de forraje y semilla. El primer componente básico de un programa de riego en pasturas es conocer la distribución estacional de la producción de forraje para cada especie.

Con la información proveniente de una importante base consistente en 33 ensayos de evaluación de variedades forrajeras sembradas en INIA La Estanzuela, se determinaron las tasas de crecimiento y su variación (García et al., 1996).

La distribución estacional de las especies y su producción en toda la vida productiva se presenta en el Cuadro 1.

**Cuadro 1.** Distribución estacional (%) y forraje total producido en toda la vida productiva (t ms/ha) de trébol blanco, lotus, trébol rojo y alfalfa (García et al., 1996).

	Trébol blanco	Lotus	Trébol rojo	Alfalfa
Otoño (%)	12	12	9	9
Invierno (%)	23	14	15	6
Primavera (%)	52	49	50	39
Verano (%)	13	25	26	46
Total (t MS/ha)	15,1	21,5	17,4	32,8

La información presentada muestra que en términos generales lotus y trébol rojo produjeron la mitad del forraje en primavera y la otra mitad entre otoño-invierno y verano. Por su parte trébol blanco tuvo una baja contribución en el verano y alfalfa fue la única especie con una alta contribución estival (García et al., 1996).

Este trabajo permitió además establecer las tasas de crecimiento mínimas, máximas y promedio para las cuatro especies. Estos autores encontraron una gran amplitud entre las tasas mínimas y máxima de crecimiento. Las tasas de crecimiento máximas representan la producción de forraje esperable bajo condiciones ambientales no limitantes, que cabe aclarar, no están únicamente ligadas con el déficit hídrico. Este mayor crecimiento potencial, sin embargo, no modifica la curva promedio de distribución estacional de cada especie. Las tasas de crecimiento máximas obtenidas en este estudio fueron 73, 64, 120 y 105 kg ms/ha/día para trébol blanco, lotus, trébol rojo y alfalfa respectivamente.

La información obtenida es clave para definir estrategias y potencialidades de riego para estas especies. Así, por ejemplo, el riego en trébol blanco tendrá como objetivo mejorar la persistencia de esta especie, como se mostrará más adelante. Por su parte, el riego en alfalfa permitiría la obtención de cortes valiosos de primavera-verano como aumento de la base forrajera para la lechería o la ganadería intensiva.

Como se dijo previamente, los antecedentes en investigación sobre la respuesta al riego en pasturas son escasos y discontinuos en el tiempo. Los trabajos realizados en la década del 70 e inicios de los 80 del siglo xx se centraron en conocer los potenciales de producción de las especies bajo riego, y los criterios de riego más aptos para

las mismas considerando las características de nuestros suelos.

Así las conclusiones de los primeros trabajos desarrollados en alfalfa (Hofstadter, Carámbula y Gonnet, 1976), reportados por Hofstadter (1983) mostraron una fuerte interacción entre la respuesta al riego en esta especie y la oferta hídrica. Para los 3 años evaluados, el incremento promedio en la producción de forraje en el tratamiento bajo riego fue de un 15 %, debido a las buenas condiciones de oferta de agua y a la capacidad de exploración radicular de esta especie.

Sin embargo, estos autores señalan la posibilidad de lograr cortes de alta producción y valor estratégico durante veranos secos que no se alcanzan bajo secano. Por otro lado, el riego a un umbral de 30 % de agua disponible fue superior al tratamiento con umbrales de riego de 60 % (riegos más frecuentes) que determinó pérdidas importantes de plantas. Esta interacción de la respuesta al riego con la oferta hídrica del año determina que otros trabajos reporten incrementos de un 100 % en la producción de forraje de alfalfa para dos veranos secos (Cardellino et al., 1982).

Paralelamente se comenzaron en ese momento experimentos para estudiar la respuesta al riego en trébol blanco y trébol rojo. Los resultados mostraron una respuesta al riego en ambas especies. En el caso de trébol blanco la respuesta en producción de forraje fue de alrededor de un 20 %, con respuestas algo mayores en el 2º año de la pastura.

La investigación en riego de pasturas en el Litoral Sur fue retomada luego de un largo período a fines de 1990 en trébol blanco (García et al., 2000) y trébol rojo, lotus, alfalfa y festuca (Sawchik y Formoso, 2000).

En el caso de trébol blanco, el riego fue empleado con la estrategia de levantar algunas limitantes ambientales que afectan su persistencia en nuestras condiciones. Dentro de ellas, las altas temperaturas estivales y los frecuentes déficit hídricos en esta estación son factores que afectan su vida productiva.

Así, se desarrollaron experimentos (1996-2000) con el objetivo de estudiar los efectos del déficit hídrico del suelo y el manejo de la defoliación sobre la producción de forraje de dos cultivares

de trébol blanco (Zapicán y Kanopus) en mezclas con festuca (Arana et al., 2000; García et al., 2000).

Los principales resultados muestran que a partir del segundo año de vida, los tratamientos bajo riego lograron recuperar el mismo número de estolones cada año, mientras que en los tratamientos bajo secano disminuyeron gradualmente afectando la persistencia de la especie. Esto significaría que, año tras año, los riegos aplicados reestablecen la capacidad de la pastura de producir forraje y hacen posible su persistencia productiva (Arana et al., 2000).

Como resultado, los tratamientos bajo riego produjeron significativamente más forraje durante los cuatro años de duración de la pastura, y estas diferencias se hicieron más notorias a partir del segundo año (Cuadro 2).

En resumen, la diferencia en producción de forraje de los tratamientos regados fue de 11.9 ton MS ha (alrededor de 3.0 t MS/ha/año) y las EVA estimadas fueron de 8 a 29 kg MS/ha/mm lámina, siendo los máximos alcanzados en el trébol blanco de 3<sup>er</sup> año.

Paralelamente desde el año 1997 se condujeron diversos experimentos cuyo objetivo era la definición de umbrales de riego óptimos para distintas leguminosas, los potenciales de rendimiento de forraje alcanzables teniendo en cuenta la capacidad de exploración radicular de las diferentes especies (Sawchik y Formoso, 2000).

Los umbrales de riego evaluados fueron de 40 % (agotamiento del 60 % de agua disponible) y 75 % (agotamiento del 25 % de agua disponible). Esto determina la aplicación de láminas mayores de menor frecuencia y láminas menores de mayor frecuencia para uno y otro caso respectivamente.

En el año 1997/98, estos tratamientos se aplicaron a 3 especies: t. rojo, alfalfa y lotus. En el Cuadro 3 se presentan los rendimientos de forraje acumulados para t.rojo.

Cabe acotar aquí que la producción de forraje corresponde al período 3/11 – 31/3 de la estación de crecimiento. Para este experimento se consideró una profundidad radicular de 40 cm para el cálculo de la lámina de reposición. La respuesta al riego fue significativa pero de baja magnitud (20 %). Los períodos de déficit hídrico fueron escasos y de corta duración y aún en ese caso el agua disponible fue de un 20 a 30 % (datos no presentados) en el tratamiento bajo secano.

En el caso de alfalfa cv. Crioula, especie con una capacidad de exploración radicular en profundidad mayor que el trébol rojo, no hubo diferencias significativas en producción de forraje bajo los 3 regímenes hídricos señalados.

En este caso el riego además incidió en el porcentaje de plantas afectadas por podredumbre húmeda de la raíz causada por *Phytophthora*. Mientras en el secano el porcentaje de plantas afectadas fue de 1.6 %, en los tratamientos bajo riego éste alcanzó un 65 %.

Los datos obtenidos en lotus mostraron tendencias similares a alfalfa en términos de respuesta en producción de forraje al riego.

En el año 1998 se instaló un experimento con 4 especies: 1) festuca cv. Tacuabé, 2) trébol rojo cv. INIA Mizar, 3) lotus cv. INIA Draco y 4) alfalfa cv. Crioula. El objetivo era estudiar bajo las mismas condiciones de suelo y edad de la pastura, la respuesta en producción de forraje al riego de estas especies, su capacidad comparativa de exploración radicular en profundidad, con un umbral de riego prefijado de 30 - 40 % de agua

**Cuadro 2.** Producción anual de trébol blanco bajo secano y riego y eficiencia de uso del agua (kg ms/ha/mm-1 aplicado) (adaptado de Arana et al., 2000).

	Prod. componente Trébol blanco (t/MS/ha)		Diferencia (Riego - Secano) (t/MS/ha)	Lámina aplicada (mm)	Kg MS/ha/mm aplicado
	Secano	Riego			
<b>Año 1</b>	3.0	5.2	2.2	167	13.2
<b>Año 2</b>	5.2	7.6	2.4	151	15.9
<b>Año 3</b>	1.8	7.0	5.2	174	29.9
<b>Año 4</b>	0.4	2.5	2.1	263	8.0

**Cuadro 3.** Producción de forraje (tms/ha) para 1º año de trébol rojo cv. LE 116 en 3 regímenes hídricos (Sawchik y Formoso, 2000).

Tratamiento	Secano	Riego 1	Riego 2
		(Umbral 40 %)	(Umbral 75 %)
Prod. Acumulada (t MS/ha)	6.8	8.1	8.0
Rendimiento relativo	100	119	118
Lámina neta Aplicada (mm)		100	140

disponible. Se consideró para el cálculo de la lámina de reposición de agua una profundidad de 40 cm. Como criterio conservador se trató de reponer el agua hasta un 80-90 % del agua disponible, de forma de evitar excesos en el caso de que ocurrieran precipitaciones.

Para el año de instalación de las pasturas (año húmedo) no se encontraron respuestas significativas al riego en producción de forraje para ninguno de los cortes en trébol rojo, alfalfa y lotus. Las deficiencias hídricas para este año ocurrieron básicamente durante la primavera. La única especie que manifestó respuesta al riego fue la festuca, en los cortes de primavera. Globalmente para el período de crecimiento analizado, el tratamiento regado para esta especie rindió un 10 % más que el secano. Esta especie presenta un sistema radicular más superficial que el de las leguminosas y esto puede explicar en parte la respuesta obtenida.

El año 1999/2000 que representaba el 2º año de edad de la pastura fue uno de los más secos de la serie histórica climática en La Estanzuela. Este año puede considerarse cercano a la máxi-

ma demanda de agua para una pastura. En el Cuadro 4 se presenta la producción de forraje acumulada para la primavera – verano de esta estación de crecimiento.

Este año puede caracterizarse como extremo y es donde se notaron respuestas muy importantes en producción de forraje al riego. Estas estuvieron relacionadas en parte con la capacidad de exploración radicular de cada especie.

Trébol rojo y festuca (datos no presentados), de sistemas radiculares más superficiales al menos triplicaron los rendimientos de forraje en el período considerado.

En el caso del lotus, su raíz pivotante es importante para la persistencia de la especie aún en condiciones muy secas y eso explica en parte su buena adaptación a ambientes como el de nuestra región (García-Díaz y Steiner, 1999). Santiñaque y De Battista (2003) estudiaron la interacción de dos factores, nivel de estrés hídrico y manejo, y su impacto en la producción de forraje. Sin restricción hídrica, el manejo aliviado (corte cada 44 días en promedio) incrementó el rendimiento de forraje total un 46 % con respecto al manejo frecuente (corte cada 22 días en promedio). En la medida que se impusieron déficit hídricos progresivos, se mantuvo la respuesta positiva del manejo aliviado sobre las variables de crecimiento de las raíces (aumento de la densidad) pero esto no se reflejó en la producción de forraje. Así, bajo condiciones de estrés severo este tratamiento tuvo un mayor gasto de agua por evapotranspiración. Esta interacción del manejo por el criterio de riego no fue considerada en el experimento reportado por Sawchik y Formoso (2000), lo que puede haber limitado la respuesta en producción de forraje al riego para el período primavera-verano.

**Cuadro 4.** Producción acumulada de forraje (primavera-verano) para tres leguminosas en su 2º año para el año 1999/2000 (Sawchik y Formoso, 2000).

	Alfalfa		Trébol rojo		Lotus	
	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego
t MS/ha	8.5	14.2	1.8	6.4	4.4	5.8
R.Relativo Testigo Base 100	100	167	100	355	100	131
Kg MS/ha/mm Aplicado promedio		16.9		13.6		4.2

En el caso de alfalfa, a pesar de su capacidad de explorar agua en profundidad, sus altas tasas de crecimiento en verano determinan un mayor consumo de agua que el resto de las especies estudiadas, por lo que el riego potenció su capacidad para producir forraje. La importancia de esta especie en los sistemas forrajeros de nuestro país es obvia en vista de los resultados obtenidos, ya que permitiría amortiguar los déficits de forraje en condiciones de baja disponibilidad de agua. El tratamiento de alfalfa bajo secano aún en un año extremo como el 99/2000, rindió más que los tratamientos regados de las otras especies. Cabe acotar sin embargo, que no son estrictamente comparables los datos de producción de trébol rojo con las demás especies, ya que el pico de producción de ésta generalmente se da en el primer año.

Las tasas de crecimiento de alfalfa y trébol rojo para el período considerado se presentan en la Figura 2. Las tasas máximas de crecimiento para la alfalfa se obtuvieron en el corte de enero. Los valores máximos son similares a los obtenidos por Díaz-Lago et al. (1996) en un estudio sobre tasas de crecimiento para las leguminosas, en base a una serie importante de ensayos de pasturas desarrollados en La Estanzuela. En el caso del trébol rojo, el pico de producción es más primaveral. El trébol rojo en el tratamiento de secano no persistió más allá del mes de febrero.

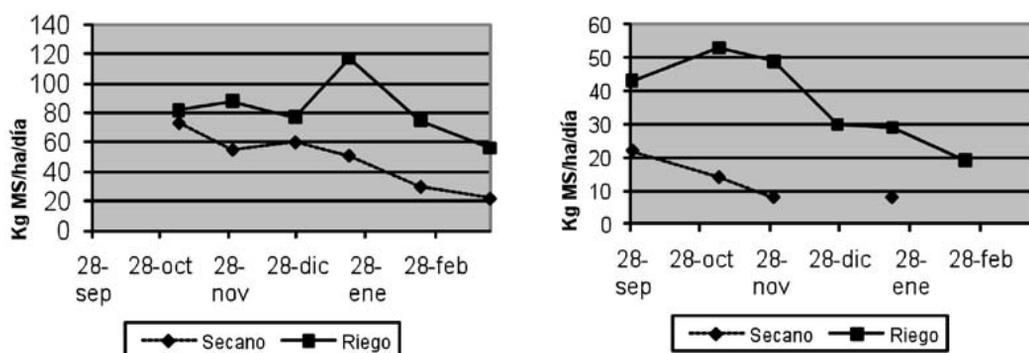
Uno de los objetivos de este experimento era además estudiar la capacidad de exploración radicular en profundidad de estas especies.

Para ello se realizaron muestreos periódicos de humedad en el perfil, utilizando metodología apropiada para esos fines. Tanto lotus como alfalfa presentaron una alta exploración radicular en profundidad aunque con eficiencias de uso de agua mayores en esta última especie.

Los resultados preliminares obtenidos para estas especies dan una pauta de su posible inclusión en sistemas bajo riego. El lotus sería la especie menos apropiada por lo ya expuesto, de todas formas la base experimental para esta aseveración es aún muy estrecha y debería considerarse fuertemente la variable manejo o frecuencia de corte. En el caso de trébol rojo, la exploración de altos rendimientos puede verse beneficiada en mayor medida durante el 1<sup>er</sup> año porque el cultivo presenta mayores tasas de crecimiento en este período y un menor desarrollo radicular. Pueden obviamente producirse condiciones de déficit hídrico moderado o severo que, como en este caso, incrementen la producción del 2<sup>o</sup> año.

En el caso de la alfalfa, además de enfatizar su buena producción en condiciones de secano, existe la posibilidad por su ciclo más estival de potenciar la producción de forraje con el riego. En esta especie y dada su flexibilidad, es posible dimensionar áreas más grandes en sistemas bajo riego debido a su buena resistencia al estrés hídrico. Por otro lado cabe puntualizar que el riego a umbral fijo durante toda la estación de crecimiento no tendría mayor sentido, y más bien se debería tender a explotar los períodos en los cuales estas especies presentan sus mayores tasas de crecimiento. Esta sería una forma de ar-

**Figura 2:** Tasas de crecimiento para el período primavera-verano 1999/2000 bajo secano y riego en leguminosas de 2º año: a) alfalfa; b) trébol rojo.



monizar la existencia de cultivos de alta demanda pico como el maíz, con áreas consideradas marginales para el riego como las pasturas.

Las eficiencias máximas logradas para el caso de alfalfa fueron de alrededor de 35 kg de MS/ha/mm aplicado en los momentos pico de producción. El costo del riego juega aquí un papel fundamental en determinar la viabilidad económica del riego de pasturas con destino a forraje. Cabe recordar que la persistencia de trébol rojo y alfalfa pueden verse seriamente afectadas por enfermedades en aquellos sistemas que apliquen láminas de riego muy altas y mantengan condiciones de muy alto contenido de agua en el suelo durante el verano por la problemática de enfermedades de raíz y corona.

En resumen, la información nacional sobre la respuesta en producción de forraje al riego en esta región, si bien es aún insuficiente, muestra claramente el comportamiento diferencial entre especies. Así, en trébol blanco, el riego suplementario puede aumentar notoriamente la persistencia de este componente puro o en mezcla con gramíneas. La alfalfa, por su parte, tiene un alto potencial de crecimiento estival, que puede potenciarse con el uso del riego con láminas adecuadas. La respuesta del trébol rojo también es interesante, en especial, durante el primer año, en donde alcanza sus máximas tasas de crecimiento. La información obtenida con gramíneas perennes es aún insuficiente, sin embargo algunos datos preliminares muestran una importante respuesta al riego, sobre todo cuando se dan condiciones de estrés hídrico durante la primavera.

### **Riego para producción de semilla**

Los antecedentes en esta región muestran diferentes potencialidades del riego para la producción de semilla. Los experimentos desarrollados en trébol blanco mostraron en general una respuesta al riego en producción de semilla. Sin embargo, puede provocar, en el caso de la primera cosecha un alargamiento de la fase vegetativa y un retraso de la fecha de la misma.

García et al. (2000) en experimentos destinados a estudiar la producción de semilla de trébol blanco encontraron que el impacto del riego se maximiza cuando el período de floración se desplaza hacia el verano. En ese sentido, para la

evaluación de dos años, el riego no afectó la producción de semillas en los momentos de cierre tempranos (21 de setiembre en Zapicán y 18 de octubre en Kanopus), pero aumentó significativamente los rendimientos en los cierres tardíos (fines de octubre y noviembre), y fue una variable de mayor peso en la segunda cosecha. Así, en la primera cosecha, el riego aumentó el rendimiento de semillas en un 23 %, con un marcado incremento de la biomasa producida (88 %). En la segunda cosecha el incremento promedio fue de un 100 % en la producción de semilla, con un incremento del número de cabezuelas y el rendimiento individual de las mismas.

Un importante aspecto a considerar en la producción de semilla de leguminosas forrajeras es que el requerimiento hídrico óptimo, en otras palabras, el contenido de agua disponible en el suelo, es menor para producir semilla que forraje (Clifford, 1979, 1986) y en algunas especies la reducción del crecimiento vegetativo durante la floración tiende a incrementar la producción de semilla. Esto es más importante en especies como trébol blanco, lotus y alfalfa que poseen plantas y tallos indeterminados por tanto una muy alta disponibilidad de agua determinará un aumento excesivo de la producción de forraje en detrimento de la producción de semilla (Formoso y Sawchik, 2000). En el caso de alfalfa y trébol blanco, el rendimiento de semilla se optimiza limitando el desarrollo vegetativo a través de la aplicación de cierto estrés hídrico (Clifford, 1986; Steiner et al., 1992; Oliva et al., 1994c). Esto también ha sido observado en lotus *corniculatus*, en donde es aconsejable mantener un valor menor de 50% de agua disponible en el suelo en etapas reproductivas para optimizar el rendimiento de semilla (García-Díaz y Steiner, 1999; Formoso y Sawchik, 2000).

De las diferentes especies estudiadas se hizo especial énfasis en trébol rojo y trébol blanco (ya discutido). El trébol rojo es una especie que por sus características fisiológicas tiene potencial para la producción de semilla bajo riego. Presenta crecimiento determinado de sus tallos lo que implica una limitante fisiológica frente a excesos de crecimiento vegetativo que puedan generarse con una alta disponibilidad de agua. De las leguminosas estudiadas, es la especie que presenta además mayores probabilidades de segunda cosecha si se maneja correctamente la

fecha de siembra, la fecha de cierre y la disponibilidad del riego (Formoso y Sawchik, 2000).

Estos autores, bajo regímenes pluviométricos superiores a los normales (zafras 97/98 y 98/99), no encontraron diferencias significativas en producción de semilla entre tratamientos de secano y riego. Sin embargo, bajo condiciones de sequía importantes, el riego aplicado enseguida del cierre del semillero, promovió el rebrote rápido de las plantas aumentando la posibilidad de cosecha. Esto fue más importante aún al inicio del segundo rebrote con destino a una segunda cosecha. El riego a su vez promovió aumentos significativamente muy importantes en la producción de cabezuelas y el número de semillas por cabezuela. En general los rendimientos de semilla mayores se observaron cuando el agua disponible en el suelo entre inicio del rebrote y el pico de floración era de un 60 % y los menores cuando se llegaba solo a un 25 % de agua disponible.

Estos resultados, en términos generales, coinciden con los reportados previamente en el país (Hofstadter y Gonnet, 1979). Cabe resaltar que estos resultados se lograron con una baja competencia de polinizadores por otras plantas, elemento clave para la producción de semilla en esta especie.

### 13.3. Región Este

La información sobre respuesta al riego suplementario en esta región proviene básicamente de sistemas arroz-ganadería o arroz-pasturas (Mas, 2004). Dicho autor realiza un análisis crítico del componente pastura en la rotación con arroz y concluye que la mezcla comúnmente utilizada en estos sistemas (raigrás, trébol blanco y lotus) tiene escasas posibilidades de ser potenciada mediante el riego suplementario. Esto es debido fundamentalmente a que la distribución de forraje de esta mezcla es invierno-primaveral y como hemos visto anteriormente el riego no modifica la distribución estacional de forraje.

Analizando los componentes de la mezcla y considerando el riego como un recurso exclusivamente estival, el raigrás no debe ser tenido en cuenta ya que en la época de riego está en estado de semilla. El trébol blanco si bien puede responder a la disponibilidad de agua en el suelo durante el verano, es fisiológicamente ineficien-

te para crecer y competir en esas condiciones ambientales y por lo tanto es generalmente superado por otras especies mejor adaptadas, particularmente *Cynodon* (gramilla). El *Lotus corniculatus* es una especie relativamente adecuada para responder al estímulo hídrico aunque los excesos de humedad en el verano pueden favorecer la incidencia de enfermedades de corona normalmente asociados con la persistencia. En la medida que las condiciones de drenaje empeoran el problema mencionado aumenta su importancia.

En cuanto a la posibilidad de sustituir el raigrás por gramíneas perennes, el falaris ocuparía espacio a nivel del suelo durante los meses de verano, aunque sin producir forraje debido a su marcada característica fisiológica de descanso estival. La festuca, a pesar de su ciclo invierno-primaveral presenta la característica de responder a la disponibilidad de agua fuera del mismo, aunque su utilización durante el verano atrasa su rebrote otoñal desplazándolo hacia el invierno, pudiendo comprometer en algunos casos su competitividad y persistencia.

El comportamiento de pasturas de ciclo invierno-primaveral en condiciones de riego, fue evaluado en un experimento sobre rastrojo de arroz, previa eliminación del microrelieve mediante preparación convencional del suelo. Todos los tratamientos tuvieron una base de trébol blanco, incorporando una gramínea perenne en sustitución del raigrás. Las opciones elegidas fueron festuca, falaris o la mezcla de ambas. Los tres tratamientos definidos por las gramíneas tuvieron la variante de la inclusión o no de *Lotus corniculatus*, haciendo un número total de seis tratamientos. El experimento recibió riego por inundación y posterior drenaje en función de las necesidades derivadas de los registros pluviométricos. El número de riegos por temporada variaron entre tres y cuatro a partir de la primavera tardía y fundamentalmente durante los meses del verano.

Si bien se registraron diferencias entre mezclas, el Cuadro 5 muestra la tendencia general a la caída de los rendimientos en los años sucesivos. El forraje producido, 8.8 t de MS/ha en el primer año, disminuye en un 20% el segundo año, 30% en el tercer y cuarto año, hasta llegar a un 50% en el quinto y último año de evaluación. Esta última caída del rendimiento estuvo asociada

**Cuadro 5.** Rendimiento (kg MS/ha) de mezclas invernales con riego en la zona Este (Mas, 2004)

Mezclas	T	Año 1	P	Año 2	P	Año 3	P	Año 4	P	Año 5	P	Total	P
F + Tb	1	7885	b	5042	d	5609	c	5377	abc	3241	d	27154	b
F + Tb + L	2	9269	ab	7894	bc	5843	bc	6307	abc	4515	a	33829	a
Ph + Tb	3	8670	ab	7211	c	6692	a	6721	a	4137	abc	33431	a
Ph + Tb + L	4	9286	ab	9289	a	6625	ab	6470	ab	4388	ab	36060	a
F + Ph + Tb +	5	7822	b	5857	d	5433	c	5140	bc	3700	cd	27953	b
F + Ph + Tb + L	6	9776	a	8560	ab	5680	c	4908	c	3801	bcd	32724	a
			t		**		*		t		*		**

t= P<0.10; \* = P<0.05; \*\* 0P< 0.01

con una pérdida generalizada de las especies sembradas.

De acuerdo a los resultados obtenidos con gramíneas y leguminosas invierno primaverales, se enfatiza la conveniencia de utilizar especies de ciclo estival y en especial de gramíneas subtropicales puras o en mezcla con leguminosas. A partir del análisis de información de experimentos independientes evaluados en condiciones de riego y secano que no fueron diseñados específicamente para estudiar la incidencia productiva de este factor, se presenta una estimación de la respuesta al riego en gramíneas subtropicales para suelos Planosoles del Este (Cuadro 6).

Los resultados muestran diferencias de escasa importancia entre los materiales probados en condiciones de secano, resaltando el efecto riego que expresa con claridad distintas capacidades de respuesta entre las gramíneas evaluadas. Se destaca en ese sentido la superior aptitud de algunas subtropicales con respecto al género *Paspalum* que fue utilizado como testigo en función de su reconocida adaptación a

las condiciones ambientales de la región. De un relativamente modesto incremento de 50% para el *Paspalum dilatatum* excelentemente implantado, se pasa a valores siempre mayores al doble. El *Panicum maximum* llega a un cociente muy superior al resto de 4.4 explicado por una alta producción con riego y un cociente bajo, ya que sin agua produjo solo 3.3 toneladas de MS/ha. Las evaluaciones realizadas con leguminosas estivales incluyó especies subtropicales de diversos géneros entre las que se destacaron *Desmodium intortum* y *Lotononis bainesii* por producción y persistencia. El *Lotus corniculatus* utilizado como testigo fue el material de mayor destaque en todos los casos. La aplicación de riego produjo incrementos en la producción de forraje entre 2 y 3 veces con respecto a los obtenidos en condiciones de secano (Cuadro 7).

Los trabajos realizados utilizando mezclas forrajeras tradicionales de lotus y trébol blanco con un componente gramínea estival, *Setaria sphacelata*, mostraron resultados promisorios bajo condiciones de riego, y una mejor distribución de forraje durante el año (Figura 3). El

**Cuadro 6.** Respuesta al riego en gramíneas subtropicales (Mas, 2004).

Gramínea	Rendimiento (kg MS/ha)		Relación Riego/Secano
	Secano	Riego	
<i>Paspalum dilatatum</i> com. Australia	4710	7120	1.5
<i>Paspalum notatum</i> Pensacola	3910	6190	1.6
<i>Setaria sphacelata</i> cv.Kazungula	5930	12990	2.2
<i>Chloris gayana</i> Callide	5160	13630	2.6
<i>Chloris gayana</i> com. Brasil	5100	13580	2.7
<i>Panicum coloratum</i> Bambatsi	3805	10960	2.9
<i>Chloris gayana</i> Katambora	4960	15650	3.2
<i>Panicum maximum</i> Gatton	3280	14420	4.4

**Cuadro 7.** Estimación de respuesta al riego en leguminosas (Mas, 2004)

LEGUMINOSA	Rendimiento (kgMS/ha)		R/S
	Riego	Secano	
Lotus corniculatus	9030	4650	1.9
Desmodium intortum	7200	2940	2.4
Lotononis bainesii	8090	2880	2.8

Nota: promedio de varios años y experimentos. r/s = cociente riego/secano

padrón estacional resultó absolutamente lógico en función de las características de los componentes de la mezcla. El trébol blanco comenzó a producir a partir de junio-julio, el lotus en agosto y la Setaria se encargó de la contribución netamente estival de la pastura (Mas, 2004). El manejo de utilización de las leguminosas templadas limitó en alguna medida la expresión de la gramínea.

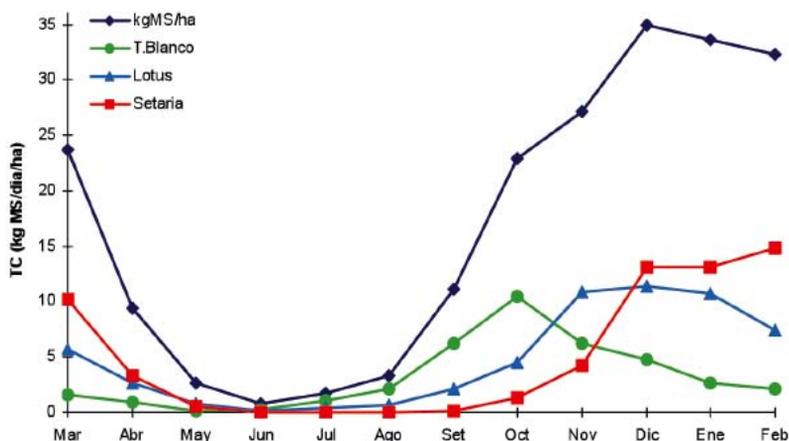
En un experimento se compararon tres mezclas estivales con y sin riego. En el quinto ciclo productivo se midió la respuesta en términos de crecimiento diario en materia seca para la pastura (Figura 4) y verde para las fracciones botánicas (Figura 5). A los efectos del presente caso se seleccionó la mezcla *Setaria sphacelata* cv. *Kazungula*, *Lotus corniculatus* y *Trifolium repens*. Para el período analizado los cortes para estimar rendimiento fueron realizados en 18/11; 07/01; 13/02 y 10/05 y los riegos en 15/12; 30/12 y 26/02. La fertilización anual fue de 40 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en forma de Superfosfato. No se

incluye la producción registrada previo al corte del 18/11 (3.3 t MS/ha), ya que el primer riego tuvo lugar después del mismo.

Durante el período de evaluación se constató una clara respuesta al riego en los primeros 50 días, seguido de un período de 37 días en los que se produjo el efecto inverso con tasas de crecimiento mayores para secano. El tercer tramo de crecimiento de 86 días no mostró diferencias importantes entre ambos tratamientos.

En una primavera particularmente seca (ver pluviometría en figuras 4 y 5), el riego explica la alta tasa de crecimiento de la pastura regada (82 kgMS/ha/día), 4.5 veces mayor a la de la pastura sin riego (18 kgms/ha/día). Inmediatamente después que tuvo lugar el segundo riego, se registraron precipitaciones importantes que sumaron 216 mm durante el mes de enero, y 49 más en la primera década del mes de febrero previo al corte del 13/02. El tratamiento con riego fue afectado negativamente en estas circunstancias,

**Figura 3:** Producción estacional de una pastura regada compuesta por setaria, trébol blanco y lotus.

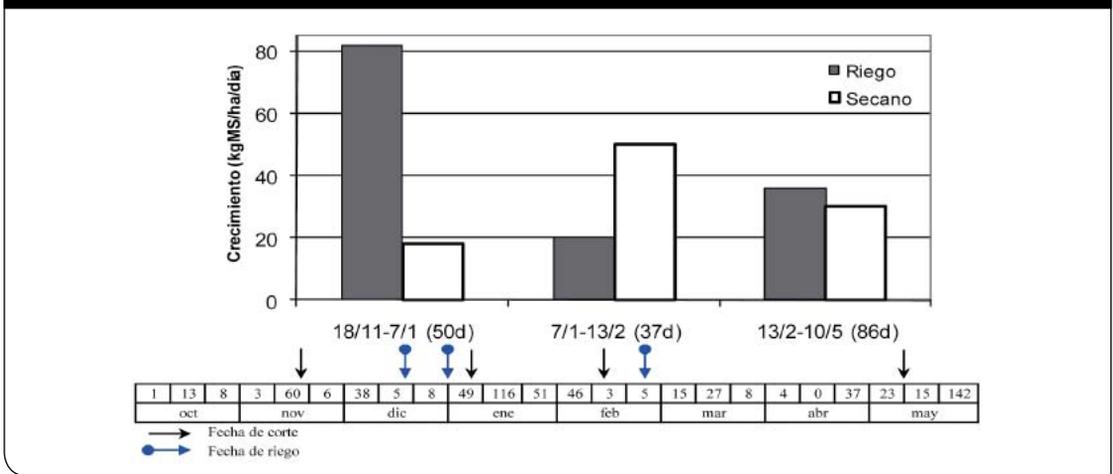


ya que al agua aportada por el riego se sumaron las importantes precipitaciones mencionadas. Durante los 37 días entre los cortes del 07/01 y 13/02 es muy probable que se mantuviera un exceso de agua en el suelo en función de sus características físicas: permeabilidad lenta, drenaje imperfecto y escasa capacidad de almacenaje de agua con la presencia de un horizonte B textural a 30 cm de profundidad. En estas circunstancias, la pastura sin riego mostró una tasa de crecimiento 2.5 veces mayor a la correspondiente de la pastura regada (50 vs. 20 kg MS/ha/día respectivamente). Después del 13/02 las lluvias fueron inferiores a las normales, y se volvió a regar diez días después del corte.

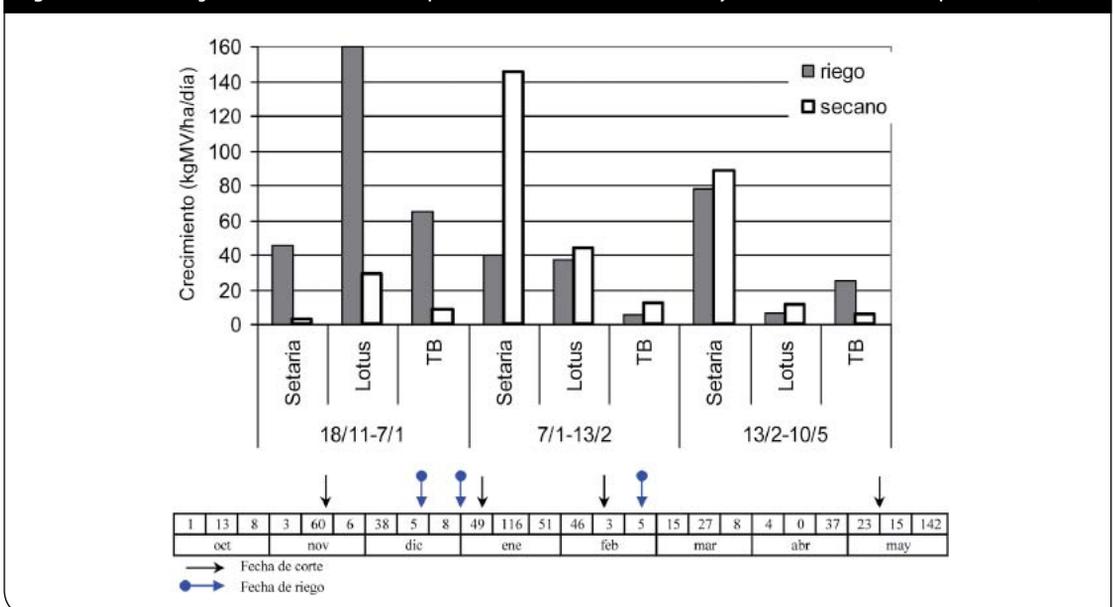
Cuando se realizó la última evaluación con fecha 10/05, las diferencias a favor del riego fueron del orden del 20%. Este incremento carece de respaldo estadístico por lo que la tendencia observada no debe ser necesariamente atribuida al efecto riego.

Si bien todos los componentes de la mezcla acusaron el efecto negativo del exceso de agua en el suelo, se observa un comportamiento diferencial a nivel de especies (Figura 4). El lotus y el trébol blanco, muestran tendencia a un mayor crecimiento en el tratamiento sin riego durante el período analizado. Sin embargo, como las diferencias se establecen a partir de valores bajos,

**Figura 4:** Efecto del riego en el crecimiento de una pastura estival de cinco años (adaptada de Mas, 2004).



**Figura 5:** Efecto del riego en el crecimiento de los componentes botánicos de una mezcla forrajera estival de cinco años (adaptada de Mas, 2004).



el resultado es poco relevante en la producción total de la pastura. Por el contrario la *Setaria* y en forma opuesta a lo que podría esperarse, se expresa claramente a favor del tratamiento sin riego con tasas de crecimiento casi cuatro veces mayores, aportando más del 70% de la producción de la pastura durante el período en análisis.

Durante el período de primavera caracterizado por lluvias muy inferiores a los promedios históricos, la *Setaria* sin riego tuvo un crecimiento insignificante, siendo también muy limitado el crecimiento de lotus y trébol blanco. El tratamiento riego en este caso destacó especialmente la respuesta de las leguminosas que registraron tasas de crecimiento entre 6 y 7 veces superiores a las del tratamiento de secano. El crecimiento correspondiente a verano-principios de otoño estuvo dominado por la fracción gramínea que fue responsable del 70% del crecimiento de la pastura durante dicho período. El lotus a pesar de haber mantenido un buen número de plantas por unidad de superficie registró tasas de crecimiento muy bajas, mientras que el trébol blanco, a partir de un valor insignificante para secano, mostró una tendencia clara a un mayor crecimiento cuando la humedad no fue limitante. Este efecto podría ser explicado directamente en función del riego aplicado a fines de febrero, o bien indirectamente, como consecuencia de mejores tasas de sobrevivencia y mayor vigor de plantas y estolones durante el verano.

Como puede verse en los resultados la respuesta de las leguminosas al riego se presentó confusa, especialmente la del trébol blanco que mostró dificultades para producir forraje en los meses de verano. Por el contrario el riego de la gramínea estival, en este caso *Setaria sphacelata*, arrojó resultados promisorios.

Actualmente, los trabajos que se desarrollan para los suelos bajos del Este enfatizan en el manejo de esta última especie para aumentar su productividad y utilización animal (Pravia, 2009).

Por su parte, es necesario destacar que buena parte de la producción comercial de semilla de forrajeras se realiza hoy en esta región, principalmente en los suelos de Lomadas. La información generada en riego suplementario para el Litoral Sur en especies como trébol blanco, debe ser adaptada a las condiciones ambienta-

les (edáficas, climáticas) locales. Asimismo, es claro que dentro de una serie de alternativas y prácticas de manejo disponibles tendientes a aumentar la oferta forrajera de esta región, el riego suplementario merece estudios de mayor profundidad en especies adaptadas y promisorias para la zona.

---

#### 13.4. Región Norte

En el Norte de nuestro país y en especial en la región de suelos sobre Basalto se desarrolla como producción predominante la ganadería extensiva sobre campo natural. Los suelos de la región presentan una alta variabilidad, desde suelos muy superficiales (Litosoles) hasta suelos profundos de alta productividad potencial. Es común además que esta variabilidad de suelos se presente a nivel de establecimiento lo que dificulta la predictibilidad y el manejo de la oferta forrajera ante déficits hídricos.

La producción forrajera presenta una alta variabilidad entre años debido a variaciones en los regímenes hídricos (Berreta y Bemhaja, 1998). A su vez la distribución mensual en la producción de forraje es muy estacional, con mínimos de producción durante el invierno. En los meses de verano es posible alcanzar niveles importantes de producción de forraje si los regímenes hídricos son favorables pero la producción se ve seriamente afectada por eventos de sequía muy frecuentes (Pérez Gomar, 2004).

Una de las alternativas para potenciar la oferta forrajera de la región es combinar adecuadamente especies, manejo y el uso del riego suplementario sobre los suelos más profundos. En ese sentido desde el año 2002 se vienen desarrollando líneas de investigación para determinar las necesidades hídricas y el potencial de especies forrajeras bajo riego sobre estos suelos.

Así se evaluó el comportamiento de diferentes especies forrajeras y su respuesta al riego sobre Vertisoles en INIA Glencoe. Los principales resultados reportados fueron: a) se obtuvo una respuesta en producción de forraje al riego suplementario en trébol blanco y trébol rojo y las eficiencias de uso de agua estimadas fueron 7.2 y 9.5 kg ms/ha/mm para trébol blanco y rojo respectivamente; b) en los tratamientos en donde se excluía el pastoreo directo la respuesta al riego fue mayor; c) la presión de

pastoreo, expresada en una mayor resistencia a la penetración del suelo determinó una menor producción de trébol rojo (Pérez Gomar, 2004). En el verano 2007 – 2008 se realizó un experimento similar lográndose un mayor *stand* de plantas de trébol rojo, obteniéndose una respuesta de 17 kg MS/ha/mm de agua (Pérez Gomar et al., 2008).

Con la finalidad de integrar los efectos del riego en forrajeras y la producción animal, en el año 2009 se realizó un experimento de engorde de corderos sobre trébol rojo bajo riego con dos niveles de suplementación con maíz. Se utilizaron corderos Corriedale x Merino Dhone, con una carga que varió entre 20 y 25 animales/ha. La disponibilidad promedio fue de 1200 kg MS/ha y se obtuvo una producción de carne entre 311 y 413 kg/ha para los tratamientos con y sin suplementación en el periodo 4 de febrero y el 9 de junio.

En el periodo primavera 2006 – otoño 2007, se instaló un experimento con el objetivo de determinar la respuesta al riego del cultivo de alfalfa. Las precipitaciones ocurridas (162, 151 y 232 mm para diciembre, enero y febrero respectivamente) determinaron que no fuera necesario el uso del riego. En dicho experimento quedó en evidencia la importancia de la profundidad del suelo para la producción de materia seca de dicha especie, encontrándose una relación de 33 kg de materia seca por cada centímetro de incremento en la profundidad de suelo. Los valores de profundidad de suelo variaron entre 13 y 84 centímetros y la producción de materia seca entre 1000 y 5000 kg/ha en el periodo diciembre – primera quincena de marzo. Las abundantes precipitaciones luego del corte determinaron condiciones de anegamiento con la consecuente pérdida del cultivo. (Damboriarena, J.; Stinger, E. 2008.)

La búsqueda de gramíneas C4 estuvo orientada hacia especies perennes y de utilización en pastoreo directo adaptadas a los sistemas productivos del Basalto. Una de las gramíneas que reúne estas condiciones es *Setaria spbacellata cv narok*.

Desde el 16 de diciembre de 2009 hasta el 16 de abril de 2010 se llevó a cabo un experimento en el cual se evaluaron sobre esta especie tres niveles de riego (0; 30; 60 mm de lámina de riego) y respuesta a nitrógeno considerando 6

niveles (0; 25; 50; 75; 100; 150 unidades de N/ha). Se realizaron dos cortes, en el primero no se observaron diferencias significativas en los niveles de riego determinado por las precipitaciones ocurridas (840mm en el periodo 16 de diciembre – 16 de febrero). En cambio se obtuvo una respuesta significativa de 16 kg MS /kg de N agregado (Cuadro 8).

**Cuadro 8.** Producción de materia seca de *Setaria spbacellata cv narok* bajo dos niveles de riego en el segundo corte año 2010.

Tratamiento de Riego	Medias
30	4363 A
60	3785 AB
0	3455 B

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ )

En el segundo corte se obtuvieron diferencias significativas entre los tratamientos de riego 30 y el secano en producción de materia seca. No obstante entre las frecuencias de riego se observó una diferencia de 578 kg de materia seca no siendo ésta significativa. La respuesta a nitrógeno observada en el segundo corte fue de 17 kg de MS/kg de N agregado. (Pérez Gomar et al., 2010).

Conjuntamente con los estudios planteados en forrajeras se buscaron alternativas de especies de alta producción y respuesta al agua como el caso de sorgo azucarado. Ese enfoque busca manejar dichas especies en áreas reducidas con riego como seguro frente a posibles períodos de estrés hídrico. Se intenta así estabilizar la productividad forrajera del sistema en conjunto con otras medidas de manejo, de forma de reducir el riesgo de los efectos del clima en el período estival. En estudios realizados en los años 2007, 2008 y 2009 se obtuvieron producciones máximas de 25 toneladas de materia seca por hectárea en el caso de sorgo azucarado. (Pérez Gomar et al., 2008).

Esta línea experimental de trabajos continúa con el objetivo de asegurar una mayor oferta forrajera en los suelos de basalto, en especial en aquellos de mayor aptitud productiva, como forma de amortiguar y potenciar sistemas de producción ganaderos muy vulnerables a la variabilidad climática.



# 14. Rol del riego en sistemas pastoriles de producción de leche: ruta de intensificación o estabilizador del sistema

*P. Chilbroste, J. Artagaveytia, y G. Giudice*

**Pablor Chilbroste:** Facultad de Agronomía. EEMAC, Paysandú. Contacto: [pchili@fagro.edu.uy](mailto:pchili@fagro.edu.uy)

**Jorge Artagaveytia:** Ejercicio libre de la profesión. Contacto: [artaro@montevideo.com.uy](mailto:artaro@montevideo.com.uy)

**Gabriel Giudice:** Ejercicio libre de la profesión. Contacto: [yudiche@adinet.com.uy](mailto:yudiche@adinet.com.uy)

## 14.1. Introducción

La lechería es un rubro relevante para el sector agropecuario y el país en su conjunto. Algunos indicadores que soportan esta información son los siguientes:

- Existen unos 4500 productores lecheros de los cuales más del 80% viven en su predio. Estas empresas ocupan una persona cada 50 hectáreas (frente a varias cientos en el caso de los cultivos de granos y la ganadería de carne y lana), generando unos 20.000 empleos directos en la fase primaria.
- Se producen cerca de 1.500 millones de litros anuales que son procesados principalmente por 10 industrias (94% del recibo). La industria le agrega aproximadamente un 50% de valor sobre la materia prima y genera empleo directo para 3.500 personas.
- Poco más del 60% de la producción recibida en plantas industriales es exportada. Esta particularidad compartida con muy pocos países le impone al sector una alta volatilidad de precios e implica que todo crecimiento de la producción tenga como destino casi exclusivo la exportación.
- Adicionalmente la lechería 'sostiene' un importante sector de servicios nacionales a la producción tales como comunicaciones, energía, asistencia técnica, comercialización, transporte, desarrollo endógeno-territorial, etc.

La lechería uruguaya también se ha distinguido de otros rubros por su alta capacidad de organización y 'densidad' institucional. La tradición

de organización de diferentes emprendimientos asociativos para superar restricciones o hacer economías de escala apoyados en un sistema de pagos instrumentado desde la industria, es uno de los elementos que facilitaron esta institucionalidad. Otro elemento clave que explica esta mayor vocación de cooperación tiene que ver con el carácter perecedero de la materia prima y la necesidad por parte de la industria, de contar con cierta estabilidad en el acceso a ella.

La tasa acumulativa anual de crecimiento de la producción del sector lechero uruguayo en el período 2001-2007 fue de un 2.1%, el que contrasta con el valor de 4.1 % acumulativo anual registrado en el período 1990-2001. De igual forma si se analiza la evolución del sector de productores lecheros remitentes entre el año 2000 y el 2007 se podrá encontrar las siguientes tendencias:

- Se reduce la cantidad de productores remitentes de leche de 3149 a 2791 (11,4%). Reducción que está mayoritariamente concentrada en aquellos con menos de 50 hectáreas de superficie.
- Se reduce la superficie destinada a la lechería en un 12,7%. Esto fundamentalmente explicado por el retiro de prácticamente un tercio de las explotaciones de más de 2500 hectáreas (de 32 a 22) que cifran un 44% de la reducción de la superficie destinada a la lechería para el estrato.
- En contrapartida la producción remitida registró un crecimiento del 32,5% en similar período. Las explicaciones de este crecimiento se pueden encontrar en un aumento de la cantidad de ganado lechero, en el tamaño promedio de los establecimientos

y fundamentalmente en mejoras en la productividad por hectárea la que ha estado apoyada en incrementos significativos en producción individual.

En los últimos tres años, se han registrado variaciones muy importantes tanto en el precio de los productos lácteos como en el de los insumos vinculados a la producción e industrialización de leche. Adicionalmente, se concatenaron una serie de eventos climáticos (periodos agudos de déficit hídrico que cubrieron las primaveras 2006 - 2007 y casi todo el año 2008) exponiendo las dificultades del sector lácteo para competir en este escenario. Paralelamente, se ha ido explicitando una nueva realidad productiva del país signada por la expansión de la agricultura, que se da bajo una forma de organización empresarial sumamente competitiva, junto al desarrollo de otros rubros como la forestación y la intensificación de la producción ganadera. Este escenario productivo le impone a la lechería nuevos desafíos no solo en términos de posibilidades de expansión, si no para mantenerse en los niveles actuales de control y manejo de un recurso tan críticos como la tierra. Si bien en la actualidad (año 2010) la perspectiva de precios de insumos y productos ha mejorado sustancialmente, es claro que los problemas recién mencionados operan cada vez más como 'elementos del contexto' que no son transitorios y deben ser tenidos en cuenta en un proceso de re-diseño de los modelos pastoriles de producción de leche.

Es en este contexto que se ubica este trabajo con el objetivo de evaluar el impacto económico de la inclusión del riesgo en sistemas pastoriles de producción de leche. Dada la amplitud temática y disciplinaria del objetivo planteado, el trabajo se focalizará en los impactos del riego a nivel del sistema de producción en su conjunto, con énfasis en las implicancias tecnológicas de las opciones analizadas contrastando riego versus secano. Vale ya en esta sección advertir al lector que ninguno de los autores de esta contribución es especialista en riego.

## **14.2. Producción de forraje e intensificación en los sistemas pastoriles de producción de leche**

La producción de leche en Uruguay se basa en la producción de pasturas bi anuales o perennes

en rotación con cultivos anuales tanto para pastoreo como para corte, fundamentalmente ensilaje de planta entera o grano. Cuando ocurren excedentes de pasturas se cosechan generalmente como heno con una participación menor de ensilajes. La implantación de la pradera como base de los sistemas pastoriles de producción de leche se desarrolla en la década del 70 del siglo xx cambiando el modelo productivo dominante hasta la época. Si bien está innovación modificó fuertemente el diseño de los sistemas de producción de leche de la época, fundamentalmente en su base forrajera, los trabajos desarrollados en la Unidad de Lechería de INIA LE (Durán, 1996) jerarquizaban a la producción de pasturas como la principal limitante para aumentar el rendimiento de leche en Uruguay, estimándose valores máximos de 6500 kg ms por hectárea año, para un ciclo de 4 años de producción. Es en base a esta información que se delinearon ajustes en las rotaciones forrajeras, estrategias de producción y suplementación del rodeo con el objetivo de incrementar los niveles de producción por vaca y por hectárea (Duran, 1996).

A pesar del amplio reconocimiento con que cuenta la pastura como el alimento de menor costo por kilogramo de materia seca, proteína cruda o mega caloría de energía metabolizable, se dispone de muy poca información en la que se cuantifique la producción y consumo de forraje en los sistemas comerciales de producción de leche en Uruguay. Estimaciones indirectas realizadas en sistemas lecheros, indican que en el área de vaca masa de los sistemas con mejores indicadores técnicos, la producción de forraje cosechado por los animales no superó los 3000-3200 kg ms (Chilibroste et al., 2003). Estudios más detallados realizados durante el año 2002 (Artagaveytia y Giudice, 2003), reportaron estimaciones de cosecha de forraje para un grupo de 37 empresas lecheras de 2.8 (25 % inferior) a 3.3 (25 % superior) toneladas de materia seca por hectárea. Es interesante destacar que en el grupo con menor producción de forraje (25 % inferior), éste constituyó el 83 % de la materia seca consumida por los animales, mientras que en el grupo con mayor producción de forraje, éste no superó el 64 % de la materia seca total consumida por los animales. Este aspecto es relevante porque obliga a precisar que entendemos por sistema pastoril: es aquel sistema con más forraje en la dieta de los animales o el sis-

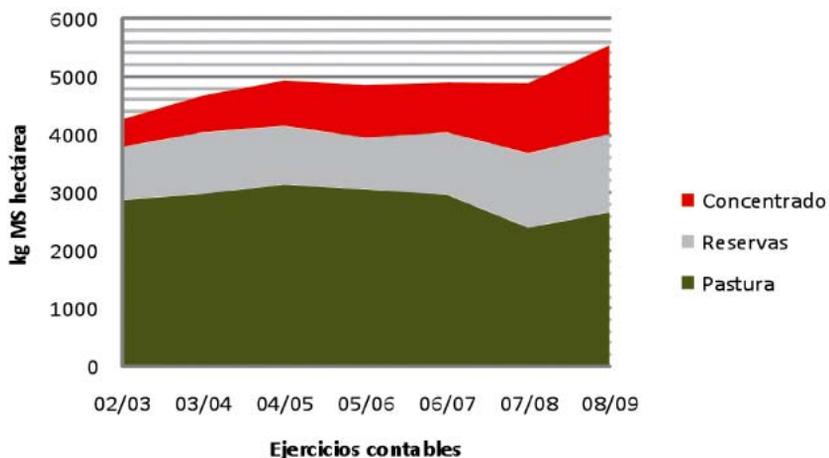
tema en el que se produce y cosecha más forraje por hectárea.

Los valores hasta aquí reportados, distan muchos de los valores obtenidos a nivel experimental en las evaluaciones de pasturas realizadas tanto por INIA como por la Facultad de Agronomía. La información disponible da cuenta de problemas estructurales en el diseño de las rotaciones los que derivan sistemáticamente en fechas de siembra tardía (Ernst, 2004) y mal manejo de la fase pastura (Chilibroste et al., 2003; Zanoniani et al., 2004). Estos dos problemas no están disociados, ya que una de las causas del sobre-pastoreo observado en el período otoño – invernial es la fuerte disociación entre la demanda por alimento del sistema que es relativamente constante a lo largo del año y la oferta de alimento que se presenta fuertemente estacionalizada. Esta última presenta valores mínimos en el período otoñal, determinado fundamentalmente por la escasez de área con forraje ya que parte importante de la misma (30 – 70 %) se encuentra en transición hacia verdeo o pradera nueva. Los datos reportados por Chilibroste et al. (2003) dan cuenta de cargas efectivas en otoño del orden de 1500 a 2500 kilogramos de peso vivo por hectárea de área con pasturas implantadas (*área efectiva de pastoreo*). Esta situación de desbalances estructurales entre la oferta y demanda de alimento en los sistemas de producción de leche los expone a condiciones de inestabilidad productiva y eventualmente a mayores costos de producción (Chilibroste,

2004). La necesidad de contar con mayor área efectiva durante el período otoño invernial y que a su vez ésta área esté conformada por pasturas de buen valor nutritivo ha revalorizado la incorporación de gramíneas perennes en los sistemas de producción leche. Mattiauda et al. (2009) presentan avances de investigación realizados en Facultad de Agronomía-EEMAC con resultados promisorios tanto en términos de productividad y estacionalidad de la producción de forraje como en producción de leche por vaca y por hectárea.

Un análisis de la evolución reciente de los sistemas de producción (Artagaveytia y Giudice, sin publicar; Figura 1) indica que la tendencia dominante en la producción y utilización de pasturas en sistemas comerciales de producción de leche no difiere de la reportada en párrafos anteriores. Los sistemas de producción monitoreados en el marco del Proyecto Costos de CONAPROLE durante el período 2002-2009 (75 tambos promedio año) presentan buenos niveles de producción por vaca masa ( $5022 \pm 1066$  L VM) y por hectárea ( $4511 \pm 1372$ ), con una alimentación basada en cosecha directa de forraje (67 a 48 % MS total), suplementada con concentrados (11 a 28 % MS total) y forraje conservado (21 a 24 % MS). El cambio en la estructura de alimentación a través de los años (Figura 1) se relaciona con un incremento en la producción de leche por hectárea (3589 a 5410 L ha) y por vaca masa (4172 a 5772 L VM). Con las restricciones y el cuidado que impone el análisis de un número reducido de matrículas, esta información

**Figura1:** Evolución del consumo de forraje, reservas y concentrados en sistemas comerciales de producción de leche durante el período 2002 – 2009. Artagaveytia y Giudice, sp.



es sumamente importante dado que revela con claridad sobre que bases se ha apoyado el proceso de intensificación de la producción de leche en los últimos años. Igualmente importante es resaltar que esta estrategia de intensificación ha transitado con buenos niveles de ingreso y rentabilidad durante la última década.

### 14.3. Resultados

La metodología de trabajo se basa en tres etapas sucesivas. La primera etapa consiste en la identificación de un sistema de producción en seco que operará como modelo de referencia o línea de base. Una vez identificado y analizado el modelo de referencia se realiza un ejercicio de intensificación (incremento en 50 % de la productividad física) en seco (etapa II) y con riego (etapa III). En cada etapa se describen los métodos y supuestos utilizados y se presentan los resultados obtenidos.

#### Etapa I: Identificación del sistema de producción de referencia.

Para seleccionar el modelo productivo sobre el cual se basará el ejercicio de simulación se tomó en cuenta la definición de ‘Modelo Típico’

Lechero adoptado por el International Farm Comparisson Network ([www.ifcndairy.org](http://www.ifcndairy.org)). En este sistema se identifica un modelo productivo como ‘típico’ cuando representa más del 50 % de la leche producida ya sea en una región determinada o a nivel nacional. El tamaño del sistema de producción típico queda definido por el número de vacas en ordeño promedio año. Basados en esta definición y tomando como referencia la información publicada por el Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca se modeló un sistema de producción de leche con los indicadores físicos y de resultados económicos reportados en los Cuadros 1 y 2.

Como sistema de referencia desde el cual realizar la simulación de un proceso de intensificación en seco o con riego, se definió una empresa lechera de 250 hectáreas totales de las cuales 164 están destinadas al manejo y alimentación de las vacas masa y 86 hectáreas al área de recría. La producción anual de leche del sistema se sitúa en el orden de 1 millón de litros. Su productividad es de media a alta (6.000 litros por hectáreas VM) con una carga de 1,03 VM por hectárea y una producción individual de 19 litros/vo/día.

**Cuadro 1.** Indicadores físicos del Modelo Productivo de Referencia

	Superficie Propiedad	Superficie Arrendada	Superficie Útil
Has de VM	137	27	164
	Área mejorada	Praderas Sembradas/año	Verdeos Verano -- Invierno
Has	72%	36	23-----13
	Pasturas	Reservas	Concentrados
Kg ha VM	3076	1674	1300
%	51	28	21
	Vacas Ordeño	Partos VM	Relación VO/VM
	n	%	%
	143	66	84
	Producción Hectárea	Producción Vaca Masa	Producción VO día
Leche L	6145	5944	19.3
Grasa Kg.	230	223	0.74
Proteína Kg.	193	187	0.60

**Cuadro 2.** Indicadores económicos del Modelo Productivo de Referencia

	<b>Producto Bruto</b>	<b>Costo</b>	<b>Renta</b>
U\$S Ha	1171	874	51
	<b>Precio</b>	<b>Costo alimentación</b>	<b>Costo producción</b>
Ctvs U\$S L	25.8	12	19.5
	<b>Ingreso Capital</b>	<b>Ingreso Neto</b>	<b>Rentabilidad %</b>
U\$S ha	298	235	5.7

La producción de forraje se basa en una rotación de verdeos de invierno y verano para pastoreo directo con una fase pastura de 3 años de duración. La producción estimada de materia seca utilizable (pastoreo + reservas) por hectárea de VM es de 4.750 kg ms/ha. La rotación opera 100 % en condiciones de siembra directa. El forraje producido y cosechado por los animales (cosecha directa + ensilaje) es suplementado con 1.300 kg/ha de concentrados, lo que deriva en una eficiencia de uso del concentrado de 210 gramos por litro de leche producido. Las reservas de este sistema se producen en base a 214 toneladas (ms) de silo planta entera cultivo de verano y 61 toneladas (ms) de silo de pasturas.

El costo por litro producido es de 19,5 centavos de dólar y obtiene un Ingreso Neto de 230 U\$S/ha total con un precio de 25,8 centavos de dólar por litro.

## Etapa II. Intensificación del sistema de referencia en condiciones de secano

Las dos propuestas de intensificación (secano y riego) se simularon en base al mismo incre-

mento de productividad (9000 lts/ha de VM; 50 % incremento sobre nivel base), alcanzando una producción anual de 1,5 millones de litros. No se simularon cambios ni en composición de la leche ni en performance reproductiva a los efectos de mantener aislados los otros factores de producción. En caso que se evalúe una propuesta de intensificación 'real', es imprescindible integrar estos aspectos dada la influencia que pueden tener sobre la trayectoria de los indicadores físicos y económicos del sistema de producción y por tanto del proyecto en su conjunto.

La rotación del modelo intensificado sigue produciendo 4.800 kg de materia seca utilizable por hectárea de vaca masa aunque con cambios en la proporción de forraje cosechado directamente y el forraje cosechado como reserva. Mientras que en el modelo de referencia se incluían 32 ha para ensilaje (25 toneladas BF por ha) y se reservaban 35 ha de pastura en forma de silo pack (10 toneladas BF), en el modelo intensificado se destinan 40 ha a ensilaje de planta entera y se reservan 32 ha de silo pack con los mismos rendimientos del sistema de referencia. El forraje producido

**Cuadro 3.** Indicadores físicos del modelo productivo proyectado en condiciones de secano.

	<b>Superficie Propiedad</b>	<b>Superficie Arrendada</b>	<b>Superficie Útil</b>
Has de VM	137	27	164
	<b>Área mejorada</b>	<b>Praderas Sembradas/año</b>	<b>Verdeos Verano - Invierno</b>
Has	72	36	20*-----20
	<b>Pasturas</b>	<b>Reservas</b>	<b>Concentrados</b>
Kg ha VM	2000	2800	3800
%	23	33	44
	<b>Vacas Ordeñe (n)</b>	<b>Partos VM (%)</b>	<b>Relación VO/VM (%)</b>
	156	66	84
	<b>Producción Hectárea</b>	<b>Producción Vaca Masa</b>	<b>Producción VO día</b>
Leche L	9041	7972	26
Grasa Kg.	339	299	0.97
Proteína Kg.	284	250	0.81

**Cuadro 4.** Indicadores económicos del modelo productivo proyectado en condiciones de secano

	<b>Producto Bruto</b>	<b>Costo</b>	<b>Renta</b>
U\$S Ha	1669	1249	51
	<b>Precio</b>	<b>Costo alimentación</b>	<b>Costo producción</b>
Ctvos U\$S L	26	14.1	19.6
	<b>Ingreso Capital</b>	<b>Ingreso Neto</b>	<b>Rentabilidad %</b>
U\$S ha	421	358	8

y cosechado por los animales (cosecha directa + ensilaje) es suplementado con 3.800 kg/ha de concentrados lo que deriva en una eficiencia de uso del concentrado de 420 gramos por litro de leche producido. El costo por litro es de 19,6 centavos de dólar y el sistema obtiene un Ingreso Neto de 360 dólares/ha total manteniendo el precio de 26 centavos de dólar por litro de leche (Cuadros 3 y 4). Este modelo de intensificación implica una inversión de U\$S 35.000 necesarios para comprar vacas, mejorar infraestructura de alimentación y la capacidad de cosecha de leche del sistema y capital de giro para la compra de concentrado.

### **Etapas III. Intensificación del sistema de referencia utilizando riego**

Al igual que la simulación presentada en la etapa II en esta propuesta de intensificación se incrementa la productividad en un 50 % (9000 lts/ha de VM), alcanzando una producción anual de 1,5 millones de litros.

La propuesta se basa en la incorporación de un sistema de riego con el que se cubre el 33% del área destinada a las vacas masa. La incorporación del riego permite incrementar la producción de la rotación de 4.800 a 7.100 kg de materia seca utilizable en el área de VM. El riego se aplica sobre el área de cultivo de maíz para ensilaje (22 ha; 60.000 kg MV ha; INIA, Grass: [www.inia.org.uy](http://www.inia.org.uy)), sorgo forrajero para pastoreo (10 ha; 10 TT MS ha cosechadas; elaboración propia) y 16 ha de pradera cuyo rendimiento se incrementa un 100 % respecto a los valores de secano durante el período de primavera (Agnusdei Mónica, com. pers. 2010). La presupuestación económica de estas alternativas presupuesta un mínimo de 100 a 150 unidades de N incrementales en cada hectárea bajo riego. La información experimental es contundente en cuanto a la necesaria asociación entre estos dos insumos (agua y N).

El aumento en la producción de forraje de la rotación permite un ajuste de carga de un 60 %

**Cuadro 5.** Indicadores físicos del modelo productivo proyectado con riego.

	<b>Superficie Propiedad</b>	<b>Superficie Arrendada</b>	<b>Superficie Útil</b>
Has de VM	137	27	164
	<b>Área mejorada</b>	<b>Praderas Sembradas/año</b>	<b>Verdeos Verano - Invierno</b>
Has	72	36	10*-----20
	<b>Pasturas</b>	<b>Reservas</b>	<b>Concentrados</b>
Kg ha VM	4400	2700	1900
%	49	30	21
	<b>Vacas Ordeño (n)</b>	<b>Partos VM (%)</b>	<b>Relación VO/VM (%)</b>
	227	66	84
	<b>Producción (Hectárea)</b>	<b>Producción (Vaca Masa)</b>	<b>Producción (VO día)</b>
Leche L	9086	5519	18
Grasa Kg.	340	207	0.67
Proteína Kg.	285	173	0.56

**Cuadro 6.** Indicadores económicos del modelo productivo proyectado con riego

	Producto Bruto	Costo	Renta
U\$S Ha	1677	995	51
	Precio	Costo alimentación	Costo producción
Ctvos U\$S L	26	9.8	15.2
	Ingreso Capital	Ingreso Neto	Rentabilidad %
U\$S ha	682	620	13

(1.65 vs 1.03 vm/ha, sistema con riego y seco, respectivamente). Con este ajuste de carga es factible producir los litros por hectárea fijados como meta (9000) con niveles de producción individual más bajo que los del modelo de producción utilizados como referencia (18 vs. 19 lts por vo día para el modelo bajo riego y de referencia, respectivamente). La información de indicadores físicos del modelo simulado se presenta en el Cuadro 5.

El costo por litro producido es de 15.2 centavos de dólar y obtiene un Ingreso Neto de 620 dólares/ha total manteniendo el precio de 26 centavos de dólar por litro de leche (Cuadro 6).

Este modelo de intensificación implica una inversión adicional de U\$S 220.000 para comprar vacas, ampliar y mejorar infraestructura de alimentación y cosecha de leche, exploración de fuente de agua y compra de equipamiento de riego.

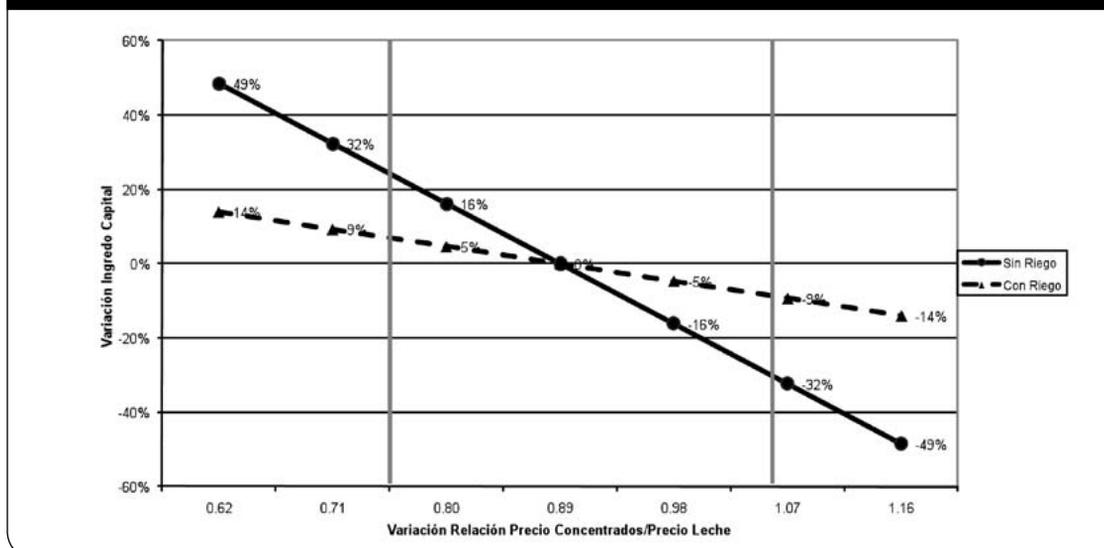
### Análisis de los proyectos de intensificación

Se calculó el flujo de fondos diferenciales entre el modelo utilizado como base de trabajo y los dos modelos simulados con los dos proyectos de intensificación en seco y con riego.

La tasa interna de retorno (TIR) del sistema sin riego dio 90% mientras que la del sistema con riego dio 29%. Por unidad de capital adicional invertido el sistema sin riego genera el triple de ganancia. El análisis del valor actual neto (VAN) de la inversión en el sistema con riego es de U\$S 1.348 por ha mientras que en el sistema sin riego es de U\$S 737. La ganancia adicional total del sistema con riego duplica la del sistema sin riego.

Adicionalmente al cálculo de la TIR y el VAN se realizó un análisis de sensibilidad del ingreso de capital a variaciones en la relación precio de leche – precio de concentrado para los dos sistemas de producción simulados. El análisis de la

**Figura 2:** Análisis de sensibilidad de los modelos de intensificación con y sin riego a variaciones en la relación precio de concentrado: precio de leche. Elaboración propia.



relación de precios entre los concentrados y la leche de los últimos 8 años arroja un valor promedio de 0.89 con mínimos de 0.75 (ejercicio 05/06) y un máximo de 1.06 (ejercicio 08/09). Los costos de los concentrados son tomados en base seca e incluyen fletes, acondicionamiento en el tambo y enriquecimiento con sales minerales y aditivos. Los resultados del análisis de sensibilidad se presentan en la Figura 2.

Del análisis de sensibilidad a la variación de la relación entre los precios de los concentrados y de la leche, surge con claridad que el sistema sin riego, más dependiente de la compra de concentrados fluctuará sus ingresos entre - 31% y + 26% según la relación de precios de los concentrados con la leche. Por otro lado el sistema en secano que aparece más vulnerable a la relación de precios grano-leche, al no implicar una alta inversión fija posibilita cambios en la combinación de recursos según la relación de precios. Mantiene un nivel de flexibilidad en la orientación del sistema de la que no dispone el sistema con riego que queda ligado a un nivel de inversión inicial muy alto (ver escala y resultados del modelo de referencia: Cuadros 1 y 2). El sistema bajo riego queda sujeto a la inversión y su repago, por lo que queda fuertemente expuesto al riesgo financiero.

#### 14.4. Consideraciones finales

Los sistemas pastoriles de producción de leche en Uruguay están asentados sobre una plataforma de producción y utilización de materia seca que tiene dificultades para superar las 4-5 TT MS por hectárea de rotación en el área de vaca masa. Los elementos de diagnóstico sobre este problema están centrados fundamentalmente en problemas de diseño de la rotación forrajera y de manejo de la intensidad de defoliación de la fase pastura de la misma. Si bien tanto a nivel de investigación como a nivel comercial se están evaluando modelos alternativos de producción de biomasa éstos están aún en fase de prueba.

Los procesos de intensificación en secano que no logran revertir esta situación de base, se encaminan inevitablemente a un “embudo” productivo que los orienta hacia la estabulación. Los incrementos de productividad han estado ligados a ajustes de carga y fundamentalmente de explotación del potencial genético disponible en los sistemas basados en la suplementación

con concentrados y uso de reservas forrajeras. Los análisis de registro de sistemas comerciales son inequívocos en cuanto a la tendencia de estos sistemas a incorporar mayor proporción de cultivos de verano para reservas (grano y ensilaje de planta entera) en sus rotaciones, en detrimento de la producción y cosecha de pasturas. La necesidad de estos sistemas de operar con niveles altos de reservas responde a un criterio de seguridad en la estabilidad de producción de leche y por tanto en el flujo de dinero con independencia de las variaciones climáticas. Los otros componentes que empujan a un cambio en el modelo productivo son los objetivos de producción individual: las necesidades en cantidad y calidad de alimentos e infraestructura y el confort para alimentar una vaca de 9500 L (26 L vo día en el modelo intensivo) son significativamente diferente de las requeridas para alimentar vacas de 7000 L (19 L vo día en el modelo de referencia). Las exigencias en RRHH también son más altas. La simulación de un proceso de intensificación sobre esta base arroja mejoras de un 40% en el ingreso de capital con un aumento en el costo de alimentación (12 vs 14 centavos de dólar por litro para el modelo de referencia y mejorado, respectivamente). Si bien este modelo tiene un alto nivel de exposición (rigidez) a las variaciones en la relaciones de precio concentrado: leche, mantiene respecto a sistemas con inversiones fijas más altas, un nivel razonable de flexibilidad para ajustar sus metas productivas según las expectativas de mercado. ¿Es factible revertir la situación de ‘base’ de una pobre producción de materia seca en los sistemas de producción en secano?. Algunas evidencias experimentales y productivas a nivel comercial sugieren que sí, lo que abrirá una nueva ventana de oportunidades para la intensificación en secano.

En este contexto el análisis de la integración del riego en el modelo productivo arroja resultados muy promisorios. La simulación del modelo con riego mejora significativamente el ingreso de capital (prácticamente lo duplica) con menores costos de producción globales y de alimentación. Es claro que el rol del riego en el sistema es aumentar la capacidad productiva de materia prima del modelo y que para ello hay que dirigir el agua a los componentes con mayor potencial de respuesta (cultivos de verano) y a las etapas de mayor potencial de respuesta productiva de las pasturas (primavera) y/o con mayor riesgo

de sobrevivencia (verano). En la competencia por área agrícola detectada en los modelos de intensificación en seco, el riego claramente puede sacar presión sobre ésta permitiendo a su vez por la mayor carga del sistema un uso más diverso e intensivo de diferentes alternativas forrajeras. La simulación del modelo con riego presenta otro elemento destacable: el nivel de producción individual es muy similar al del modelo de referencia, lo que evitaría incursionar en ajustes de técnicas de alimentación e infraestructura muy diferentes a los actualmente disponibles. Así como llamamos la atención sobre los riesgos implícitos del modelo de intensificación en seco enumeramos aquí los vinculados al riego: 1) de carácter financiero, 2) de rigidez tecnológica y económica financiera del sistema, 3) de infraestructura para manejo de cargas significativamente más altas que las actuales, 4) de

manejo de efluentes, estiércol y erosión en los lugares de concentración de ganado, 5) de capacidad de gestión y control de un nuevo proceso en el sistema, 6) riesgo tecnológicos frente a los nuevos problemas que aparecerán en el corto y mediano plazo vinculados a la práctica sistemática del riego (Agnusdei, com. pers. 2010).

Finalmente destacar que la información aquí presentada no es más que un ejercicio metodológico para intentar dar respuesta a la pregunta formulada por la organización del evento. No obstante el ejercicio está basado en información experimental y recogida en forma sistemática a nivel de sistemas comerciales de producción de leche. Seguramente entre los modelos simulados exista una gama de opciones intermedias igualmente interesantes que las evaluadas en este trabajo.



# 15. ¿Es viable económicamente el riego extensivo en Uruguay? <sup>2</sup>

L. Piedrabuena

Lic. Ec. Laura Piedrabuena. Facultad de Agronomía. Universidad de la República y Grupo de Desarrollo del Riego, Uruguay. Contacto: [lpiedrabuena@inia.org.uy](mailto:lpiedrabuena@inia.org.uy)

## 15.1. Introducción

Reducir la incertidumbre respecto al nivel y periodicidad de las lluvias, es un objetivo planteado desde siempre en la agricultura. El tener asegurado un recurso clave, como lo es el agua, para los cultivos así como para la producción animal, en algunos casos permite eliminar la incertidumbre acerca de los rendimientos esperados, y en otros, posibilita la producción de variedades, que bajo los volúmenes de lluvias existentes en determinadas zonas del globo, no sería posible.

Es así que cada variedad vegetal tiene una determinada necesidad hídrica, lo que implica no sólo un cierto volumen de agua, sino también una frecuencia. La producción bajo valores óptimos de volumen y frecuencia de agua, resultan de difícil obtención en las condiciones climáticas naturales. Por ello, a través del riego, es posible maximizar la producción mediante una cantidad adecuada de aplicaciones de agua que compensen el déficit de lluvias, con el fin de mantener un cierto nivel de producción mínimo anual.

Diversos estudios demuestran que el riego aumenta significativamente la producción por hectárea en los cultivos tradicionalmente de secano, donde se lo utiliza como suplementario al agua de lluvia. Según FAO (2004), “la lluvia es la fuente de agua para la producción de cultivos en las zonas más húmedas del mundo, donde se produce cerca del 60 por ciento de la producción agrícola. La agricultura de secano se encuentra en cerca del 80 por ciento de las tierras arables y el riego en el 20 por ciento, produciendo

el 40 por ciento de los cultivos alimenticios del mundo. Para satisfacer la futura demanda de alimentos se espera que relativamente más cultivos sean producidos bajo riego en lugar de cultivos de secano, y similares cantidades de alimentos provendrán de ambos tipos de agricultura. Considerando la importancia de la producción de cereales en condiciones de secano, se ha prestado insuficiente atención al potencial de crecimiento de la producción en esas áreas a fin de satisfacer la demanda de alimentos”.

El objetivo del presente trabajo es analizar las diversas variables, que deben tomarse en cuenta a la hora de juzgar la viabilidad de la incorporación de riego en los cultivos extensivos, desde el punto de vista económico. El desarrollo del trabajo se plantea a lo largo de cuatro capítulos: una introducción donde se explicita brevemente la evolución del riego en Uruguay, la visión económica de la temática planteada y las bondades de la incorporación de riego en los cultivos de secano, particularmente en el maíz. Como segundo capítulo, se presentan algunos resultados de las variables de costeo más relevantes, para finalizar con algunas consideraciones finales.

## 15.2 Evolución histórica

El riego en Uruguay tuvo un mayor desarrollo en aquellos cultivos en los que el mismo era imprescindible para la producción, como lo son el arroz y la caña de azúcar. Debido a la necesidad de ambos cultivos de producirse bajo regadío, estos rubros fueron los que comenzaron a incorporarlo más tempranamente.

Posteriormente, esta práctica fue expandiéndose hacia otros cultivos en los cuales el riego es de

<sup>2</sup> La presente ponencia es una actualización del trabajo “El riego agrario en Uruguay: una aproximación económica a su desarrollo (1985-2005)”. L. Piedrabuena; J. Pivel; C. Scarsi. Monografía FCEA – UdelaR. 2008.

carácter suplementario, como los cultivos hortícolas y los frutales. En gran medida por la sensibilidad de los primeros al estrés hídrico, y para el caso de los cítricos, por las crecientes exigencias del mercado internacional en cuanto a la calidad de la fruta. Lo mismo sucede con los frutales de hoja caduca, a pesar de su reducida comercialización en el exterior, los requerimientos de calidad por parte del mercado interno han sido más exigentes.

Sin embargo para aquellos cultivos que tradicionalmente fueron desarrollados en secano, en un país de clima templado como el nuestro, el riego en principio fue descartado de los esquemas productivos. Luego de que se comprobó las bondades del mismo en dichos cultivos, y a su vez los embates del clima y la variabilidad de los precios durante la última década fueron haciendo estragos en sus márgenes, el riego comenzó a ser una alternativa a considerar en los esquemas productivos.

Es así que la evolución del riego en nuestro país puede resumirse en tres etapas:

- 1- Riego obligatorio (arroz y caña de azúcar).
- 2- Riego suplementario en horticultura y fruticultura.

### 3- Riego suplementario en cultivos extensivos.

En el Cuadro 1, se presentan datos sobre la evolución de la superficie regada en el período 1970 - 2000, para algunos rubros.

En cuanto a los cultivos de riego imprescindible, su superficie regada supera el 80% de la superficie total, por lo cual dichos cultivos continúan siendo los de mayor área regada, mientras que el 20 % restante es utilizada por los cultivos de riego optativo, los cuales a pesar de haber triplicado el área regada entre 1990 y 2000, siguen cubriendo una mínima parte de la superficie bajo regadío. Por tanto, en base a los datos censales es posible visualizar que la superficie regada es creciente para todos los rubros salvo el caso de la caña de azúcar, la cual redujo significativamente su área a partir de 1990 con el cierre de CALNU. Finalmente, debe destacarse que en 10 años (entre 1990 y 2000) la superficie total regada se duplica, lo cual se explica por una duplicación del área arroceras y el aumento excepcional que lograron otros rubros como: la huerta a campo (10.231 ha), otros cereales y oleaginosos (4.005 ha) y cultivos forrajeros anuales (3.690 ha).

Sin duda, existe una incidencia importante de la infraestructura construida mediante el progra-

**Cuadro 1.** Evolución de la superficie regada para algunos rubros

Cultivos	Carácter del riego	Superficie regada (há.)			
		1970	1980	1990	2000
Arroz	Imprescindible	35.691	54.569	65.825	174.728
Caña de azúcar	Imprescindible	8.398	9.858	10.450	2.800
Subtotal	Imprescindible	44.089	64.427	76.275	177.528
Subtotal en %	Imprescindible	84,34	81,53	83,42	81,59
Cítricos	Opcional	1.270	2.183	5.623	6.521
Hoja caduca	Opcional	846	1.455	1.514	3.838
Maíz	Opcional	319 <sup>1</sup>	905	565	3.811
Pasturas	Opcional	591 <sup>2</sup>	3.376 <sup>3</sup>	s/d	8.170
Subtotal	Opcional	3.026	7.919	7.702	22.340
Subtotal en %	Opcional	5,79	10,02	8,42	10,27
Otros	Opcional	5162	6672	7461	17725
Subtotal en %	Opcional	9,87	8,45	8,16	8,14
<b>Total</b>		<b>52.277</b>	<b>79.018</b>	<b>91.438</b>	<b>217.593</b>

1 En el Censo Agropecuario de 1970 y 1980 el maíz está dentro de la categoría otros cultivos cerealeros. Por ello se realiza el supuesto de que la superficie regada pertenece un 50% a éste último.

2 Corresponde a la superficie regada de forrajeras anuales.

3 Corresponde a la suma total de superficie regada de campo natural mejorado y praderas.

ma PRENADER, en cuanto a fuentes de agua durante dicha década. Este programa generó una infraestructura de riego superior a las 35.000 hás. potencialmente regables.

### La visión económica

El riego puede visualizarse como una herramienta útil en la búsqueda de mejores niveles de rentabilidad y estabilidad de los ingresos de los sistemas agrícolas ganaderos, mediante la reducción en la variabilidad de los márgenes netos y el aumento de su media (Cardellino y Baethgen, 2000). Esto puede deberse, tanto por aumentos en los rendimientos, y su estabilidad interanual, como por mejoras en la calidad del producto, lo cual reduce la brecha productiva y posibilita el acceso a mejores precios y mercados. Sin embargo, no siempre resulta posible su implementación, ya sea por factores económicos, de gestión o por razones físicas.

Es así que, la tecnología de riego puede ser analizada simultáneamente como una inversión, un seguro y/o como parte de un paquete tecnológico. En el primer caso, si el riego se considera como una inversión de mediano y largo plazo, su valoración se considera como un factor más en la ecuación financiera de la empresa y su rentabilidad. Para ello, se toma en cuenta su flujo de fondos futuros actualizado, de forma de estimar el tiempo de amortización de su inversión inicial y evaluar su rentabilidad futura, tanto si su inversión es realizada con fondos propios como de terceros. A su vez, se compara dicha renta-

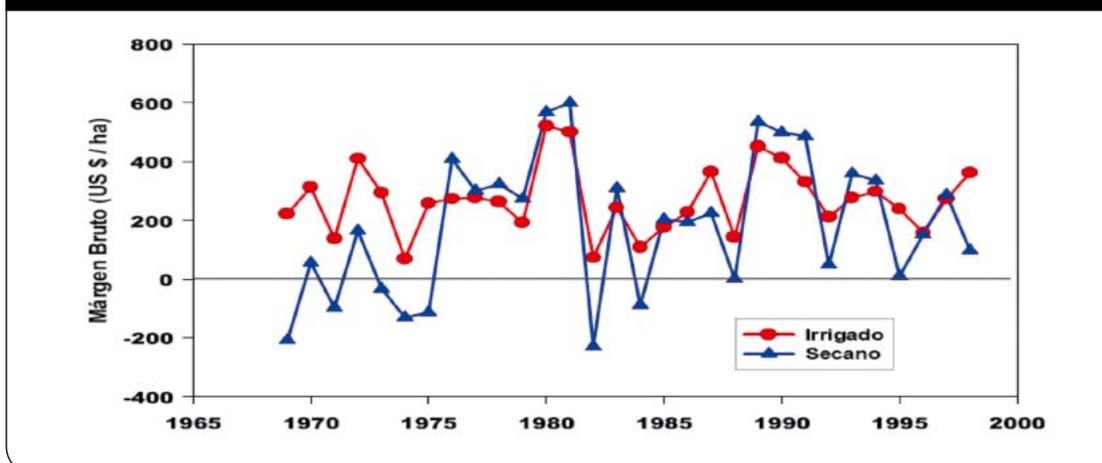
bilidad estimada con el costo de oportunidad o tasa de retorno requerida si dicha inversión la realizara en otro activo o bien de capital.

Sin embargo, lo usual es que al momento de plantearse realizar una inversión, no se tenga conocimiento cierto de todas las variables involucradas. Entre ellas se encuentran los costos futuros del capital, las materias primas, los precios de venta de los productos, etc. Es así que siempre nos encontramos en un contexto de incertidumbre.

Existen algunas formas de reducir la incertidumbre, en la actividad agropecuaria es posible encontrar al riego como una de ellas. “Seleccionar productos con baja variabilidad, el uso de planes formales de seguro, contratos a futuro y la selección de procesos productivos estables (con riego) son métodos que permiten reducir la incertidumbre o resultados desfavorables; considerar la flexibilidad y liquidez como mecanismos para prepararse ante cambios e incertidumbre”, (Heady, 1952).

El riego como seguro reduce la incertidumbre, acortando la variabilidad de los resultados económicos. A través de su implementación se intenta mitigar el riesgo de déficit hídrico, frente a la incertidumbre acerca de la disponibilidad de agua, en ocasión de la aleatoriedad en la distribución de las lluvias. Es así que podemos comparar la posibilidad de regar con la opción de contratar un seguro. Finalmente, si el riego se considera como parte de un paquete tecnológi-

**Figura 1:** Márgenes brutos (US\$/há.) para riego de maíz regadío y en seco (cilo corto, siembra de setiembre. Modelo Ceres-Maize. Período 1968 – 1999. Fuente: Cardellino, G.; Baethgen, 2000).



co, este potencia los otros factores productivos al eliminar la restricción del recurso agua.

De todas formas, el resultado económico dependerá de un análisis preciso de las soluciones técnicas apropiadas a cada situación de producción, en relación a las inversiones en fuentes de agua, distribución y equipos de bombeo, fuentes energéticas y métodos de aplicación de agua (Giménez y Mosco, 1996).

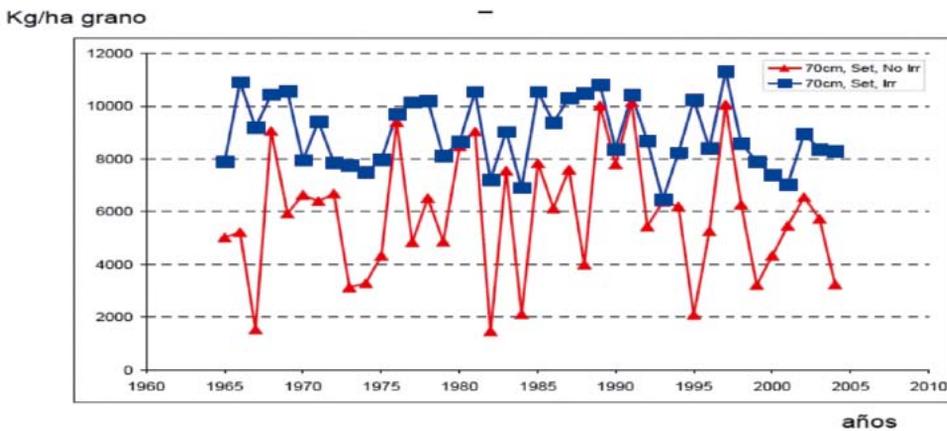
### 15.3. El riego y los cultivos extensivos: el maíz

El maíz es uno de los cultivos extensivos donde la investigación tiene mayores antecedentes

en cuanto a los efectos del riego. La incorporación de riego a las plantaciones de maíz genera una estabilidad importante de la producción obteniéndose, a su vez, mayores rendimientos físicos (Giménez y Mosco, 1996). Mediante la producción bajo riego es posible duplicar los rendimientos en secano, logrando superar los 10.000 Kg/ha.

Sin embargo, esta no es la realidad del cultivo a nivel nacional. El área sembrada de maíz y su rendimiento mantienen una relación inversa. Como se observa en la siguiente figura se distinguen dos periodos en las series. El primero (1985-2007), donde hay un importante descenso del área sembrada, manteniéndose alrededor de 50.000 (há) en la última década, y a la inversa se

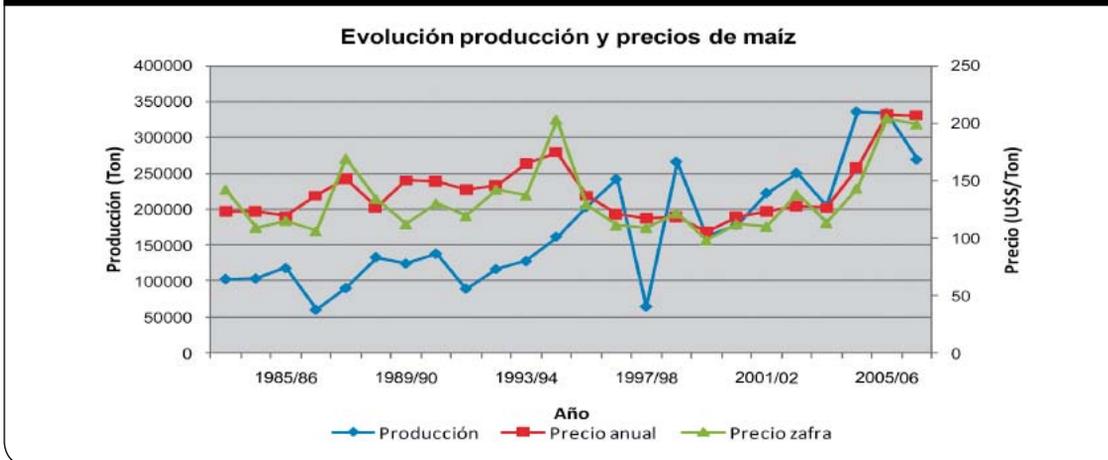
**Figura 2:** Rendimientos de maíz con y sin riego. Siembras de setiembre, profundidad de las raíces: 70 cm. Fuente: 'Análisis de la viabilidad de sistemas de riego para maíz: estudio de casos y evaluación de estrategias'. Cardellino, G.; Baethgen, W. (2000).



**Figura 3:** Evolución del área sembrada (há) y del rendimiento (kg/ha) de maíz. Período 1985 – 2009. Fuente: Elaboración propia en base a datos de DIEA – MGAP, OPYPA – MGAP.



**Figura 4:** Evolución de la producción (ton) y precio (anual y zafral) del maíz (US\$/ton). Período 1985 - 2009. Fuente: Elaboración propia en base a datos de DIEA – MGAP, OPYPA – MGAP, CMPP.



observa un aumento sostenido del rendimiento, lo cual tendería a pensar que existe una mayor especialización en el cultivo. Mientras que, a partir del 2006, se invierte la evolución descendente del área sembrada, y disminuyen los rendimientos por hectárea, luego del máximo alcanzado en 2007. Esta nueva situación que se plantea en los últimos dos años, puede ser un cambio coyuntural o estructural, de todas formas, la dinámica de los rendimientos presenta una alta variabilidad de resultados, lo cual sería un primer punto a considerar a la hora de analizar la incorporación del riego en este cultivo.

Otro elemento a integrar en la decisión de incorporar riego en los paquetes tecnológicos de cultivos extensivos, como el maíz, es el hecho de estabilizar la producción a través de la obtención de rendimientos por hectárea más estables a nivel país, y por otro lado utilizar esta herramienta para paliar la variabilidad del precio, manteniéndose en un rango de ingresos brutos por hectárea viables.

En lo que refiere a la producción, a pesar de su alta variabilidad, logra un escalón a partir de 2007, al igual que los rendimientos y el área sembrada, lo cual se debe -en parte- al aumento sostenido de los precios.

### El riego y la variabilidad de los rendimientos

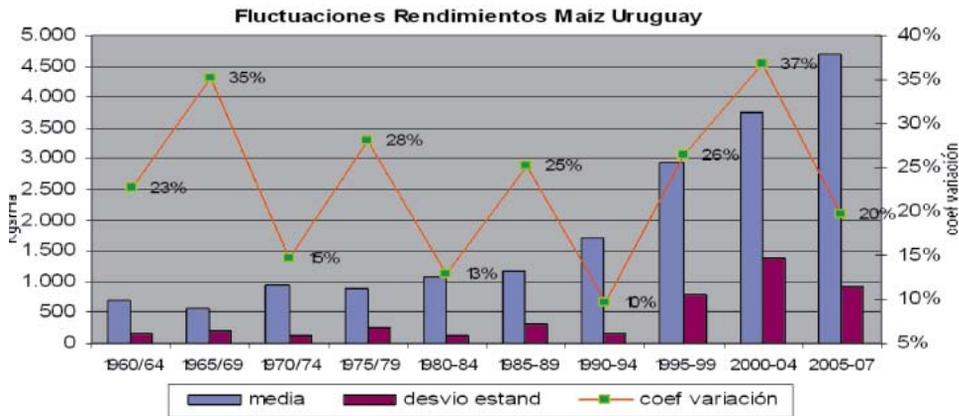
Una vez comprobada a nivel experimental las bondades del riego en el maíz, analizaremos su incidencia en la reducción de la variabilidad de

los rendimientos, así como una comparación con la variabilidad de los precios. La diferente evolución y fluctuación de rendimientos y precios permite visualizar el grado de incertidumbre que estos dos factores le incorporan a cada actividad. Para ello se analizan las medias, desvíos estándar y coeficientes de variación de los rendimientos y precios anuales del maíz, así como de otros rubros, como el arroz y el trigo.

El cultivo de maíz (especialmente en el Uruguay) presenta una alta variabilidad en su rendimiento, tanto si se observa el total del período o si se lo subdivide en períodos quinquenales. Es de destacar que la continua incorporación tecnológica efectuada en el sector arrocero, que se refleja en fuertes incrementos en su rendimiento, paralelamente reduce o estabiliza la variación de los mismos por períodos. Esto no ocurre en el maíz, ya que si bien se observa un aumento sostenido de los rendimientos promedio, los coeficientes de variación por períodos no se reducen (especialmente en los períodos donde se incluyen las dos últimas sequías importantes, 1989 y 2000 respectivamente).

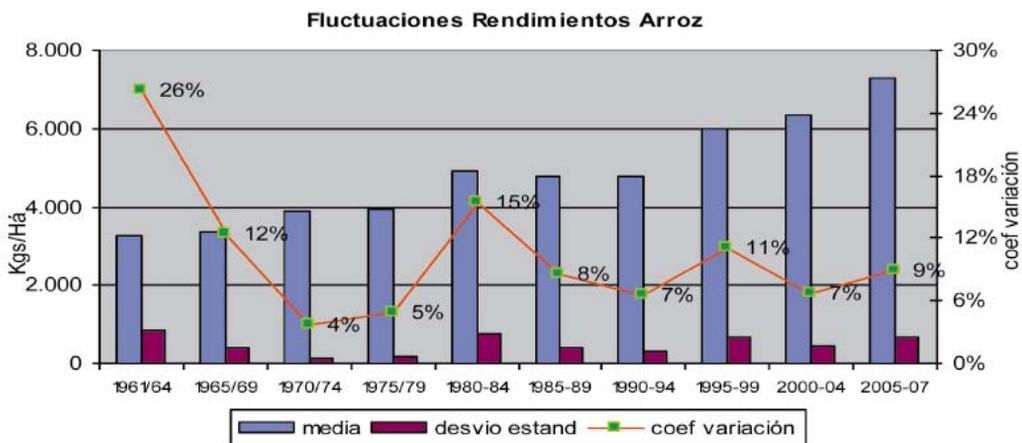
En función de lo anterior, puede concluirse que el arroz al ser un cultivo regado en un 100% del área juega un papel determinante en la estabilidad de rendimientos y por lo tanto en la reducción de los riesgos. Mientras que en el caso del maíz, el cual se riega solamente un 7% tiene una dispersión en sus rendimientos de más del 50% en el período analizado. Cabe destacar que si bien el trigo es un cultivo para el cuál no se

**Figura 5:** Evolución de la media, desvío estándar y coeficiente de variación de los rendimientos del maíz Uruguay, en kg./ha. Período 1960 - 2007.



Fuente: "El riego agrario en Uruguay: una aproximación económica a su desarrollo (1985-2005)". L. Piedrabuena; J. Pivel; C. Scarsi. Monografía FCEA – UdelaR. 2008.

**Figura 6:** Evolución de la media, desvío estándar y coeficiente de variación de los rendimientos de arroz en Uruguay, en kg./ha. Período 1961 - 2007.



Fuente: "El riego agrario en Uruguay: una aproximación económica a su desarrollo (1985-2005)". L. Piedrabuena; J. Pivel; C. Scarsi. Monografía FCEA – UdelaR. 2008.

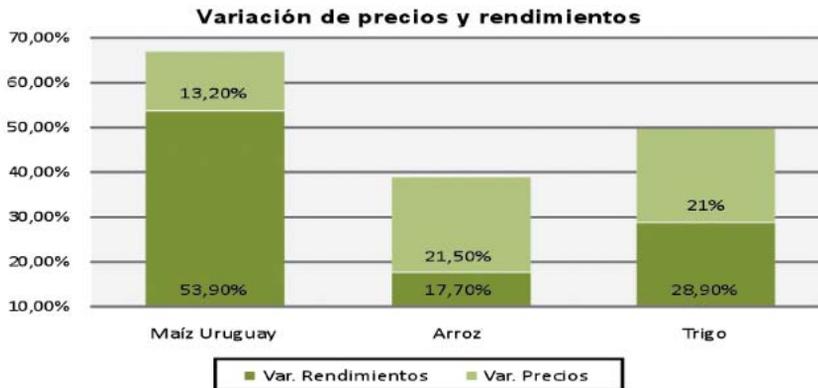
utiliza el riego y su variabilidad es la mitad de la que se observa en el maíz, el mismo es un cultivo de invierno por lo que su exposición al déficit hídrico es muy inferior al caso del maíz.

Por su parte, observando las variaciones de precios en los diferentes rubros se aprecia la inestabilidad de los mismos, sin embargo, en el caso del maíz, la variación en los rendimientos es mayor a la de los precios y en el arroz, sucede lo contrario, en el período fluctúan en mayor medida los precios que los rendimientos. Dado que

la oferta de Uruguay en estos productos en el mercado internacional es pequeña y asimismo que todos los sectores son influenciados por dicho mercado, directa o indirectamente, se torna dificultoso amortiguar las fluctuaciones con los mecanismos existentes.

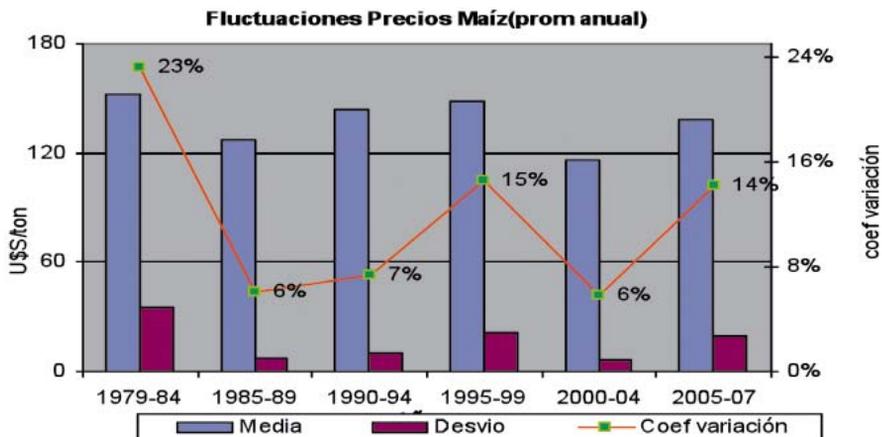
Las variables precio y producción son las determinantes del ingreso, y conjuntamente con los costos, las determinantes de los márgenes económicos agropecuarios. Partiendo del análisis conjunto de precios y rendimientos vemos una

**Figura 7:** Comparación del coeficiente de variación de los rendimientos de maíz, cítricos, arroz y trigo en Uruguay, y maíz argentino. Período 1985 - 2007.



Fuente: "El riego agrario en Uruguay: una aproximación económica a su desarrollo (1985-2005)". L. Piedrabuena; J. Pivel; C. Scarsi. Monografía FCEA-UdelaR 2008.

**Figura 8:** Evolución de la media, desvío estándar y coeficiente de variación del precio promedio anual del maíz, en U\$\$/ton. Período 1979 - 2007.



Fuente: "El riego agrario en Uruguay: una aproximación económica a su desarrollo (1985-2005)". L. Piedrabuena; J. Pivel; C. Scarsi. Monografía FCEA - UdelaR. 2008.

variabilidad acumulada importante (que puede atenuarse parcialmente si la correlación entre dichas variables es negativa) en donde nuevamente el maíz es el cultivo con mayor dispersión potencial de ingresos.

Mediante la utilización de algunos indicadores técnico-productivos, fue posible observar que la utilización del riego está asociada a una menor variabilidad en los rendimientos, contribuyendo a disminuir, en principio, el riesgo total del

negocio. El margen posible de reducción de dicho riesgo total, mediante la utilización de sistemas de regadío es cuantitativamente importante observando los datos de maíz.

## 15.4. Resultados

Existe una *trade-off* a tener cuenta en la toma de decisiones, entre los beneficios de la tecnología y el aumento de los costos asociados, debido tanto

a la inversión inicial en maquinaria y equipos, como a los costos operativos, fijos y variables.

Dado el período de tiempo involucrado, la inversión en riego es un bien duradero amortizable en varios años. Esto imprime a la actividad un riesgo derivado por costos hundidos o descalce, lo cual obliga a estimar flujos de ingresos y egresos futuros que compensen la inversión realizada. Es así que en este análisis, el productor debe visualizar la inversión en riego como de mediano y largo plazo, con los riesgos que ello implica para evaluar correctamente su decisión.

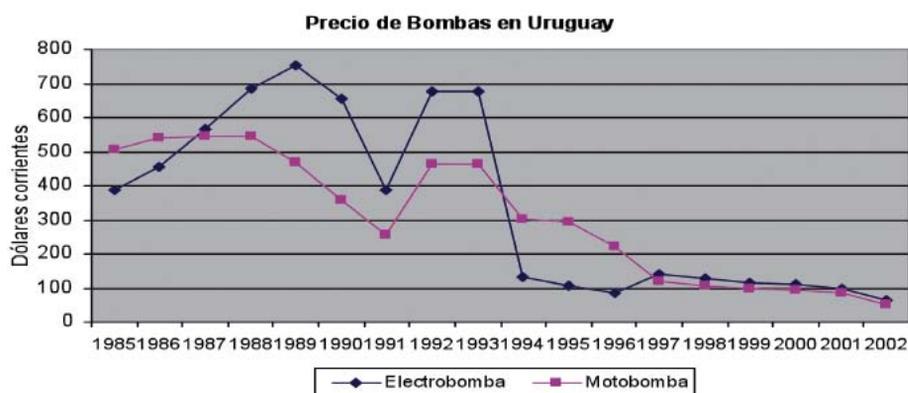
Para entender los factores que han incidido en la dinámica del riego en nuestro país y su viabilidad futura en cultivos extensivos, es importante analizar cual ha sido la incidencia de los costos de maquinaria, insumos y factores de producción (tierra, capital y trabajo) en dicha evolución.

En una primera instancia, observando las series de precios de las bombas (Figura 9), resulta clara su evolución a la baja (en dólares corrientes), a partir de mediados de los 90 del siglo xx.

Lo mismo sucede con los equipos de riego, ya que al mantener su precio incambiado (en dólares corrientes por hectárea) en un período de fuerte inflación en dólares, los mismos disminuyen en valores reales, sin embargo durante 2009 se presenta un aumento, en buena parte dado por la evolución a la baja del tipo de cambio en el último año y medio (Cuadro 2).

Para ahondar en el análisis de este proceso debe incorporarse al análisis la evolución del precio de diferentes insumos y factores productivos. La evolución de precios de las diferentes variables está expresada en valores constantes (Figura 10).

**Figura 9:** Evolución del precio de las electrobombas y motobombas, en U\$S corrientes. Período 1985 - 2002.

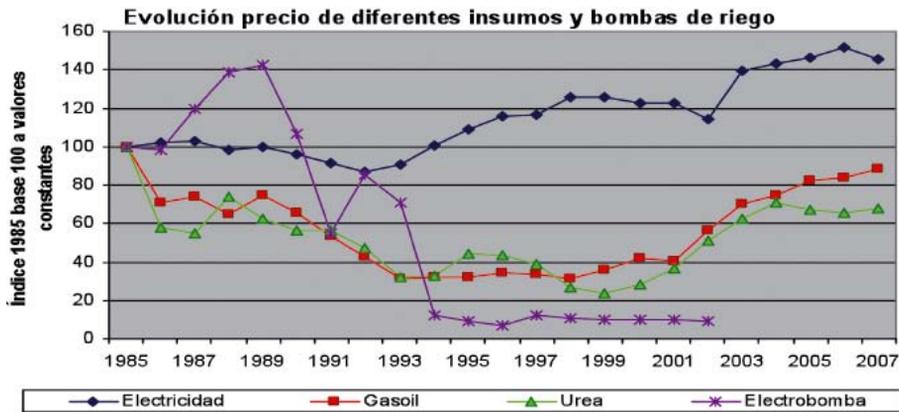


Fuente: "El riego agrario en Uruguay: una aproximación económica a su desarrollo (1985-2005)". L. Piedrabuena; J. Pivel; C. Scarsi. Monografía FCEA – UdelaR. 2008.

**Cuadro 2:** Precio de diferentes equipos de riego, en U\$S corrientes por ha. Período 2004 - 2009.

Equipos de riego	2004 - 2008	2009
Microaspersión caudal medio, fuente de agua subterránea o superficial.	1.990	2200
Lateral de goteo, más de 6 años vida útil con:		
Fuente de agua subterránea	1.366	1520
Fuente de agua superficial	1.980	2200
Lateral de goteo no autocompensado con:		
Fuente de agua subterránea	792	880
Fuente de agua superficial	1.098	1230
Aspersión caudal bajo y sistema de alas, tanto con fuente de agua subterránea, como superficial.	509	570
Equipo autoenrollable, aspersión de caudal alto (U\$S/equipo)	11.670	13000
Pívate central (80 ha).	S/D	63000

**Figura 10:** Evolución comparada de los costos de diferentes insumos y equipos, expresados en forma de índice (base 100) a valores constantes de 1985. Período 1985 – 2007.



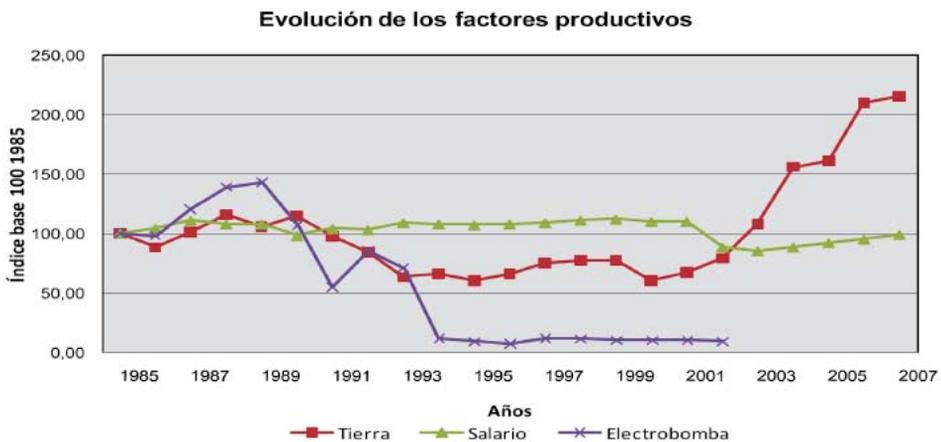
Fuente: "El riego agrario en Uruguay: una aproximación económica a su desarrollo (1985-2005)". L. Piedrabuena; J. Pivel; C. Scarsi. Monografía FCEA – UdelaR. 2008.

En las series con base 100 en 1985, se observa que el precio de las electrobombas (hasta donde llega la serie) ha descendido fuertemente, en tanto se han encarecido en forma pronunciada la electricidad a lo largo de toda la serie, mientras que el gas oil y los fertilizantes ha aumentado pero en menor grado, a partir de 2001 (Figura 11). Sin embargo, si analizamos las mismas series a valores constantes con base en el año 2001, el gasoil y los fertilizantes son los insumos que

evolucionan fuertemente al alza, quedando el precio de la electricidad en una evolución intermedia, mientras que los equipos de riego se abaratan comparativamente.

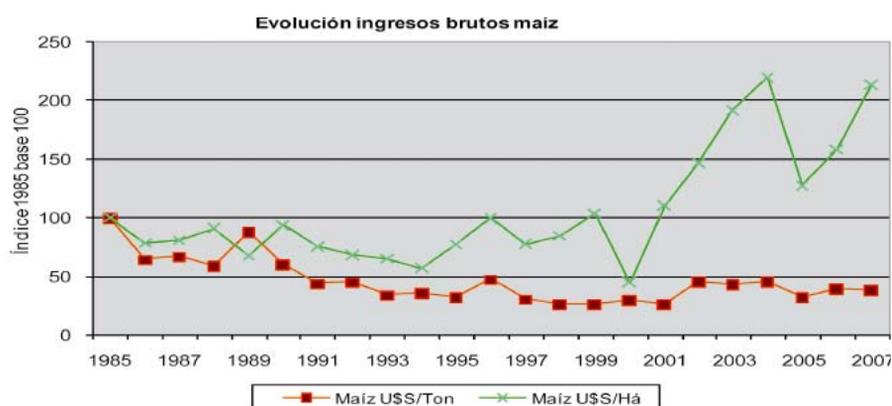
En cuanto a los factores productivos, es la tierra el factor que más se ha encarecido, incluso comparándolo con el resto de las variables presentadas. Por tanto, se reafirma la posición de que la incorporación de tecnología de riego a nivel

**Figura 11:** Evolución comparada de los factores productivos (tierra, capital y trabajo), expresados en forma de índice (base 100) a valores constantes de 1985. Período 1985 - 2007.



Fuente: "El riego agrario en Uruguay: una aproximación económica a su desarrollo" (1985-2005). L. Piedrabuena; J. Pivel; C. Scarsi. Monografía FCEA – UdelaR. 2008.

**Figura 12:** Evolución de los precios e ingresos brutos para maíz, expresados en forma de índice (base 100) a valores constantes de 1985. Período 1985–2007.



Fuente: “El riego agrario en Uruguay: una aproximación económica a su desarrollo” (1985-2005). L. Piedrabuena; J. Pivel; C. Scarsi. Monografía FCEA - UdelaR. 2008.

de cultivos extensivos debe ser una alternativa a evaluarse, por el contrario a la producción extensiva, donde el recurso tierra era el más relevante. Por su parte, el salario real ha permanecido prácticamente en el mismo nivel que al inicio del período.

Finalmente, respecto a la evolución de los ingresos brutos y precios por tonelada de maíz se observa, que en el caso de estos últimos su evolución es claramente descendente (Figura 12). Sin embargo, esta situación se ve compensada por incrementos en los rendimientos por hectárea (principalmente para el caso del maíz que parte de rendimientos muy bajos), ya que los ingresos brutos por hectárea muestran una tendencia ascendente, aunque con variabilidad importante.

## 15.5. Consideraciones finales

A lo largo del trabajo, se expusieron tanto las bondades físicas del riego, como parte de un paquete tecnológico, como los aspectos económicos a evaluar a la hora de realizar una inversión de este tipo. Sin duda, que la respuesta a nuestra pregunta inicial, sobre la viabilidad de su incorporación en cultivos extensivos, ‘depende’ del sistema productivo, la sanidad de la empresa y los factores externos, como: precio de los insumos, tasa de interés, precio del productor, entre otros. De todas formas, podemos concluir que en cualquier caso, para analizar la viabilidad del

riego en cultivos extensivos, deben considerarse las variables expuestas.

A pesar de que el diseño agronómico e hidráulico de un sistema de riego de cualquier tipo sea correcto, es necesario considerar los costos que dicha tecnología conlleva tanto fijos como operativos, así como los futuros ingresos, por lo cual es fundamental realizar un diseño que considere los tres enfoques. Lo complicado no es diseñar un sistema que cumpla con los requisitos agronómicos e hidráulicos si se considera que no existen restricciones de tipo económico, pero normalmente lo que se busca es un equipo eficiente y de costos decrecientes.

A nivel de país, el riego como tecnología que colabora en la estabilidad de los rendimientos y en algunos cultivos aumenta significativamente el rendimiento por hectárea, debe analizarse su rol como estrategia para alcanzar la frontera productiva y de esa forma convertir a nuestra agricultura en una actividad más eficiente e intensiva. Un ejemplo de ello es el arroz.

Es notorio observar que en el caso del maíz, Uruguay presenta una variabilidad de rendimientos superior al 50%, lo cual demuestra la importancia que podría tener la incorporación de una tecnología como el riego, conociendo sus bondades en el cultivo. Por su parte queda en el debe, plantear un estudio de similares caracte-

rísticas para el caso de las pasturas y otros cultivos extensivos.

En suma, desde el punto de vista económico, el riego es una tecnología que en el futuro deberá evaluarse su incorporación, con sus diversas variantes, como por ejemplo en la superficie, dadas las tendencias a nivel del mercado mundial, respecto a la demanda de alimentos (en cantidad y calidad), así como la evolución del precio de la tierra, y los bienes de capital. Por tanto, Uruguay como productor y exportador de *commodities* deberá generar estrategias que le permitan ser más competitivo, con una oferta estable, dónde el riego puede jugar un rol relevante.

---

## 15.6. Anexo

Bases para la construcción de series

ACA. Bases de datos de su página en Internet. <http://www.aca.com.uy>

ANCAP. Bases de datos de su página en Internet. <http://www.ancap.com.uy>

BCU. Bases de datos de su página en Internet. <http://www.bcu.gub.uy>

CMPP. Bases de datos de su página en Internet. <http://www.cmpp.com.uy>

INC. “Informe de la evolución del precio de la tierra. Período 1985- 2006”. Montevideo, Uruguay. Los datos en forma gráfica están publicados en la página web: <http://www.inc.gub.uy>

FAO. Bases de datos de su página en Internet. <http://www.fao.org>

INE. Bases de datos de su página en Internet. <http://www.ine.gub.uy>

MGAP – DIEA (1999-2009). “Anuarios Estadísticos Agropecuarios”. Montevideo, Uruguay.

MGAP – DIEA. Bases de datos de su página en Internet. <http://www.mgap.gub.uy>

MGAP – DIEA (1970, 1980, 1990, 2000). “Censos Agropecuarios”. Montevideo, Uruguay.

USDA. Bases de datos de su página en Internet. <http://www.usda.gub.us>



# 16. Disponibilidad de agua en Uruguay: Variabilidad – Predicción – Institucionalidad

J. L. Genta y N. Failache

**José Luis Genta:** Director Nacional DINASA, MVOTMA.

Contacto: [jlgenta@mvotma.gub.uy](mailto:jlgenta@mvotma.gub.uy)

**Nicolás Failache:** Departamento de Agua, Regional Norte, UdelAR. Contacto: [nicofail@unorte.edu.uy](mailto:nicofail@unorte.edu.uy)

## 16.1. Monitoreo, clima y predicción hidrometeorológica

### Caracterización general del clima – monitoreo

El Uruguay, al igual que la mayor parte de la región denominada Sudeste de Sud América (SESA), se caracteriza por su alta variabilidad en el régimen de precipitaciones y de caudales.

Esa variabilidad se puede describir por la existencia de una red hidrometeorológica que destaca esta región del planeta por la alta densidad espacial de registros con series centenarias.

Se disponen de más de 60 pluviómetros y más de 20 estaciones de aforo de niveles y caudales, con registros diarios, que fueron instalados entre 1905 y 1914. (Figura 1).

También existe una densa red de mediciones de temperatura de registros centenarios.

El monitoreo de caudales se inició a comienzos del siglo xx en los principales ríos y a lo largo de un siglo se amplió a la totalidad de ríos y a los principales arroyos. Si bien no ha quedado explicitado el objetivo perseguido en el momento de su instalación, esta red de monitoreo permitió el desarrollo hidroeléctrico del país y el diseño de obras hidráulicas.

De las aproximadamente 100 estaciones hidrométricas sólo dos cuencas tienen menos de 1.000 km<sup>2</sup> de superficie (la menor es la del A. San Carlos con 790 km<sup>2</sup>).

### Conclusiones:

Existen series históricas de precipitaciones y caudales muy largas en términos internaciona-

les, lo cual permite realizar análisis climáticos de alta significación estadística. Estos permiten conocer la variabilidad y tendencias de los mismos, elementos que resultan de vital importancia para determinar riesgos asociados a decisiones productivas.

El método de aforo de caudales es el mismo para todo el rango de valores, es eficiente para la medición de caudales medios y altos, no obstante los caudales mínimos tienen muy poca representatividad.

El monitoreo hidrometeorológico de estas grandes cuencas permite la modelación hidrológica a diversas escalas de tiempo.

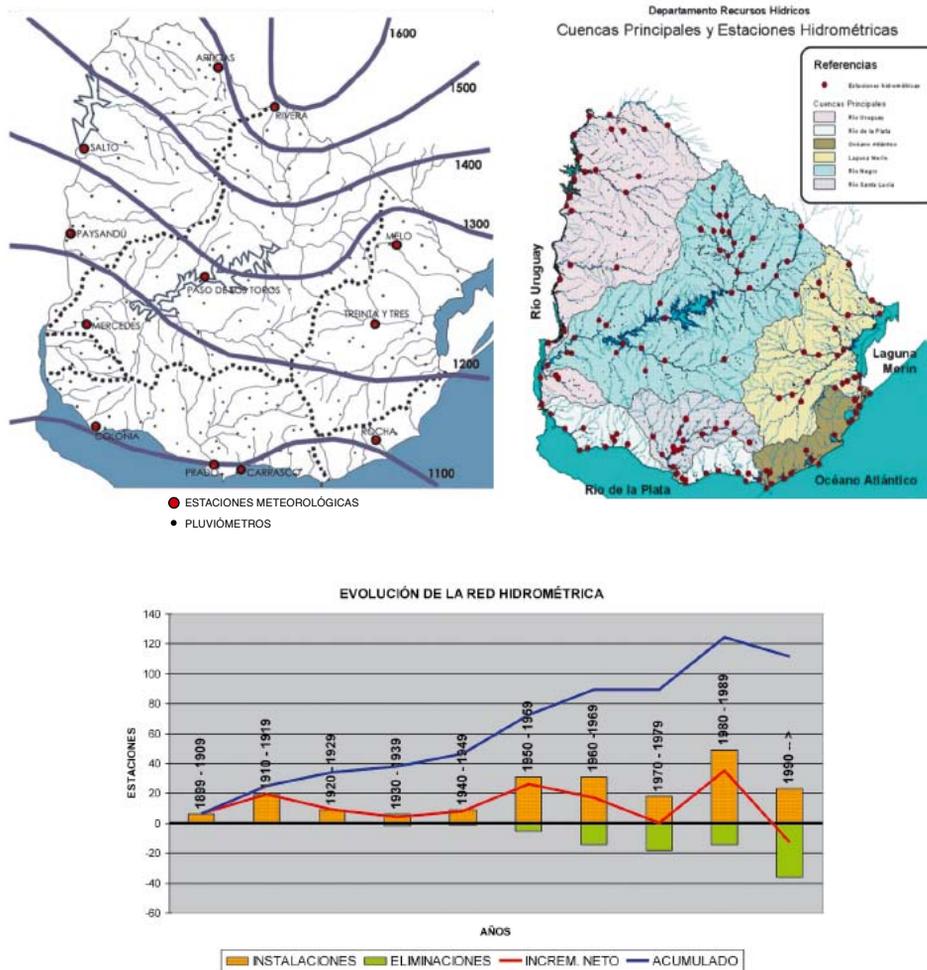
No existe una información de monitoreo sistemático de cuencas pequeñas. Cabe recordar que la disminución del área de la cuenca tiene aparejado un aumento de la variabilidad de los regímenes de caudales y por ende una disminución de la garantía de disponer de volúmenes firmes.

### Descripción de la variabilidad climática

Como resulta de los ciclos anuales de precipitaciones y caudales, tanto en sus medias como en sus desviaciones típicas, las características más destacables del clima hidrometeorológico son (Figura 2):

- las precipitaciones medias mensuales son muy similares;
- los caudales medios mensuales reflejan el ciclo medio de evapotranspiración;
- las desviaciones típicas son similares a las medias para cada mes del año;

**Figura 1:** Estaciones meteorológicas, estaciones hidrométricas y evolución de la Red Hidrométrica Nacional.



- los caudales medios en los meses en el verano son significativos pero de alta variabilidad interanual, vale la pena observar que son los únicos casos en que la desviación es mayor a la media (notoriamente desde diciembre a febrero) ;
- las desviaciones típicas anuales son sensiblemente menores que las mensuales.

**Conclusiones:**

Cualquier mes del año puede llover la media, no llover, o llover 4 veces la media.

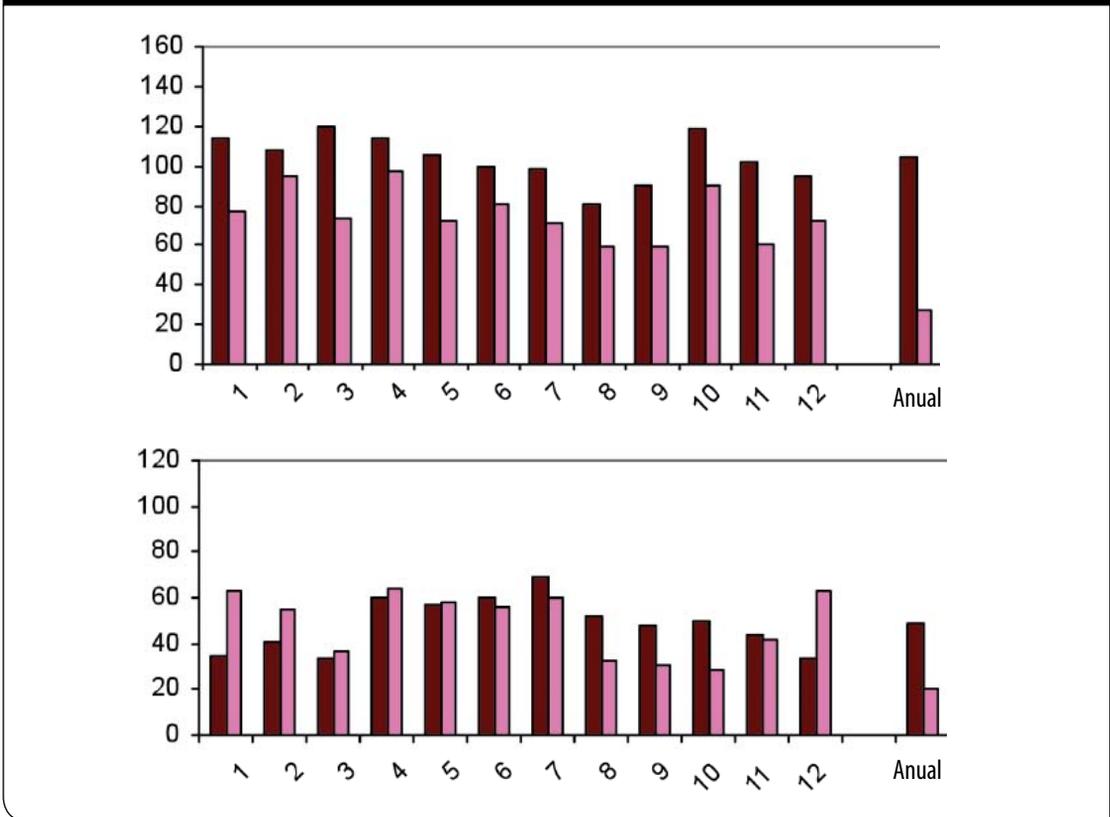
Cualquier mes del año puede presentarse el caudal medio, no haber casi escurrimiento, o escurrir 10 veces la media.

La alta variabilidad interanual de los caudales de cada mes del año y la menor variabilidad interanual de los caudales anuales, justifica la regulación interestacional de caudales a través de embalses.

El uso eficiente de los recursos hídricos pasa por considerar explícitamente la variabilidad de los mismos, dado que el ciclo anual de precipitaciones o de caudales medios mensuales es de probabilidad nula.

La predicción climática permite ‘conocer’ parte de la alta variabilidad de los valores mensuales y estacionales, principalmente a partir de la presencia del fenómeno del Niño. También se han realizado predicciones interdecádicas.

**Figura 2.** Ciclos medios de precipitaciones (gráfico superior) y de caudales (gráfico inferior), media (primer columna) y desviaciones típicas (segunda columna), en mm/mes.



La tendencia observada de cambio climático lleva a tener eventos de precipitación de mayor intensidad, por lo que si bien se podría pensar que la variación del caudal medio mensual puede ser pequeña, su variabilidad podría ser mayor, lo cual redundaría en una menor capacidad de gestión de dichas aguas para fines productivos.

## 16.2. Gestión integrada de los recursos hídricos

### Antecedentes

La igual probabilidad de lluvia en cada mes del año y la relativamente baja variabilidad de las precipitaciones anuales, justifican la producción agropecuaria de secano, pero también han sido una limitante para el uso intensivo del suelo.

El desarrollo intensivo del cultivo de arroz, agregó a los embalses, las tomas de lagos, ríos y arroyos, los que permitieron disponer de agua

en la mayor parte de las tierras actualmente destinada al cultivo de arroz.

Para la administración del agua, principalmente de las tomas, se consolidaron las Juntas Regionales Asesoras de Riego, que permitieron gestionar la variabilidad en la disponibilidad de agua en los ríos y arroyos y la localización de los embalses, en este caso el acto institucional más importante es la audiencia pública que debe realizarse previamente a la autorización de la obra.

Los valores crecientes de los predios, están siendo acompañados por una mayor tecnificación de las explotaciones agropecuarias que permita un uso intensivo del suelo, ello es acompañado por una demanda de mayor 'garantía' para disponer del agua necesaria. Como en el arroz, la "garantía" para disponer de agua, la dan embalses reguladores que deberán en su mayoría, además de asegurar la regulación interestacional, ser de multipropósito y multiprediales.

En la Ley de Presupuesto 2005-2010, con la creación de la Dirección Nacional de Aguas y

Saneamiento (DINASA), en respuesta al nuevo art. 47 de la Constitución votado en el Referéndum de octubre de 2004, se avanzó en la reglamentación de aspectos como la gestión integrada por cuencas y regiones hidrográficas, el canon como un instrumento para la mejor eficiencia en el uso de los recursos hídricos y la preservación del ciclo hidrológico. Ello se estableció en la Ley 18.610 de Política Nacional de Aguas aprobada en octubre de 2009.

En marzo de 2010, en el Día Mundial del Agua la Ministra de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA) y el Director de la DINASA presentaron la “Agenda para la Acción. Hacia un Plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos” (PGIRH): [www.mvotma.gub.uy/planagua](http://www.mvotma.gub.uy/planagua)

La DINASA participa del Grupo de Desarrollo del Riego (GDR) y del Sistema Nacional de Respuesta al Cambio Climático (SNRCC), éste en febrero de 2010 presentó su Plan de Acción: [www.cambio-climatico.gub.uy/index.php/plan-nacional](http://www.cambio-climatico.gub.uy/index.php/plan-nacional)

Las Juntas Regionales Asesoras de Riego son la expresión de la coordinación entre Recursos Hídricos de DINASA y Suelos y Aguas de RENARE del MGAP y la participación de los usuarios. En el GDR y en el SNRCC participan una gran multiplicidad de actores que abarca al gobierno nacional y los departamentales, la academia, los usuarios y la sociedad civil.

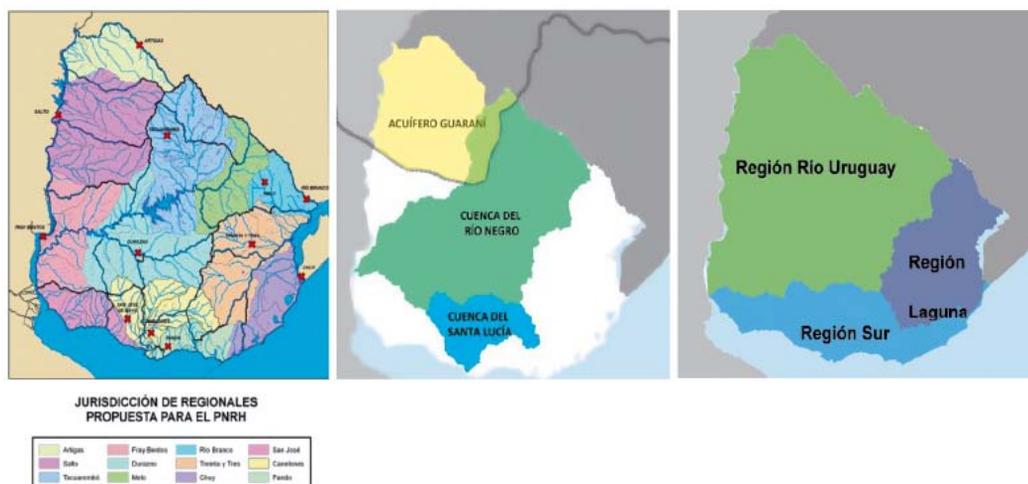
Ambas instancias se presentan como muy trascendentes en la generación de propuestas técnicas y delineación de políticas, demandada por no solo los 6.000 regantes, sino también por los 54.000 establecimientos agropecuarios. El PGIRH también abarcará: el consumo de agua potable y la salud humana, las industrias, las áreas urbanas tanto las inundables como el drenaje urbano y el saneamiento, la infraestructura carretera e hidroenergética, el turismo, etc., bajo el paradigma de la preservación de la biodiversidad de los ecosistemas terrestres y la calidad de las aguas y todo ello sobre la base de un manejo adecuado de la vulnerabilidad ante la variabilidad climática y la gestión del ‘riesgo’ climático y empresarial.

### Hacia la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos

Actualmente están registrados los grandes regantes (3.500) que representan más del 90% de las dotaciones de agua autorizadas.

Está previsto alcanzar a la totalidad de regantes a través de las Regionales de Administración de Agua y Suelo, fortaleciendo las actuales y completando las 12 regionales planificadas, e incorporando, para el registro de los usuarios a las organizaciones de productores, principalmente los vinculados a la granja y a la cuenca lechera (Figura 3).

**Figura 3.** Jurisdicción de Regionales propuestas para el Plan Nacional de Recursos Hídricos, cuencas definidas como estratégicas y Consejos Regionales de RRHH.



Para integrar al resto de los usuarios a la gestión de los recursos hídricos es necesario implementar la gestión por cuencas, generando capacidades de asesoramiento en el manejo del agua (en su mayoría demandantes de pequeñas dotaciones), implicando a las estructuras regionales del Poder Ejecutivo y a los gobiernos departamentales.

El establecimiento de políticas y la coordinación de las Comisiones de Cuencas se realizará a través de los Consejos Regionales de Recursos Hídricos de las tres regiones que se establecen en la Ley 18.610: río Uruguay, laguna Merín y Sur (Río de la Plata y su Frente Marítimo), los cuales se integrarán de acuerdo a Decretos del Poder Ejecutivo (Figura 3).

Dado el rol que tienen las cuencas del Río Negro y del río Santa Lucía en relación a la generación hidroeléctrica y al abastecimiento de agua potable, en el PGRIH se las definen como cuencas estratégicas. La instalación de las Comisiones, su integración y el rol que se les atribuya, resultarán de decretos del Poder Ejecutivo. Por el carácter estratégico regional, en el Acuífero Guaraní se establecerá un tratamiento similar (Figura 3).

El monitoreo (calidad y cantidad) y la modelación hidrológica formarán parte de las tareas de los equipos técnicos que se conformen en apoyo a los Consejos Regionales y las Comisiones de Cuencas Estratégicas.

La autoridad de agua tendrá la responsabilidad de mantener la Red de Monitoreo Básica (ríos, lagunas y principales arroyos) y realizar la línea de base de calidad de agua. Tal cual lo establece el art. 13 del Código de Agua y lo reafirma la Ley de Política Nacional de Aguas, los usuarios tendrán una alta responsabilidad en el monitoreo, principalmente en lo que respecta al aforo de pequeñas cuencas.

### **Principales desafíos**

El abastecimiento de agua potable, el uso agropecuario y la identificación de los caudales ecológicos (entendidos como la preservación de una régimen de caudales que guarde una relación adecuada con el existente antes de las intervenciones antrópicas), exige establecer un sistema de monitoreo y una modelación hidrológica para pequeños caudales de los ríos y arroyos.

Dada la diferencia en el comportamiento de la relación precipitación – escurrimiento entre las grandes y las pequeñas cuencas, es necesario realizar la modelación hidrológica de pequeñas cuencas (menos de 100 km<sup>2</sup> de superficie), de forma de disponer de una herramienta adecuada para el diseño de los embalses y la gestión de las aguas:

En la década del 90 del siglo xx se desarrollaron en las Facultades de Agronomía e Ingeniería, sendos proyectos CONICYT para el monitoreo de pequeñas cuencas en los embalses existentes. Los principales usuarios o grupos de usuarios, tienen en esas experiencias una referencia para realizar el monitoreo que la autoridad de agua les establezca.

Suelos y Aguas del MGAP realizó la carta 1:1.000.000 de caracterización de los suelos en todo el país, la cual es un instrumento fundamental para la modelación de las grandes cuencas. En algunas regiones (por ejemplo cuenca de río Cuareim) la clasificación se hace en una escala más detallada y por tanto adecuada para la modelación de pequeñas cuencas, extender este trabajo a todo el país es un objetivo fundamental para conocer la capacidad de almacenamiento de agua de los suelos.

Actualmente la evapotranspiración potencial para todo el país está estimada a partir de termómetros distribuidos en todo el territorio y la estación meteorológica del INIA en La Estanzuela. Es un objetivo fundamental, teniendo en cuenta las estaciones meteorológicas de DNM y el INIA, asegurar y procesar registros meteorológicos completos y extensos en varios puntos del país.

El INIA a través del grupo GRAS realiza hoy el balance hídrico nacional a partir de las unidades de suelo cartografiadas por MGAP, se entiende necesario ampliar dicho monitoreo de forma que los escurrimientos sean coherentes con los monitoreados en la grandes cuencas (DINASA) y extender su alcance a una versión de pronóstico de caudales medios, humedades de suelo y sequías.

Los arroceros tienen el mismo ‘riesgo’ por hectárea o por metro cúbico de agua demandada, la presencia de múltiples usuarios de agua con producciones diferentes exige manejar criterios diferentes de ‘riesgo’ en la autorizaciones de agua o más bien el valor de ‘riesgo’ lo pondrá

el propio productor. Ello llevará a considerar el valor del agua de acuerdo al impacto que tiene en cada producción. Las comisiones de cuenca y las actuales Junta de Riego tendrán una tarea más compleja, y el uso eficiente del agua, respetando el interés general y la economía global del país, puede llevar a establecer compensaciones entre productores de arándanos y arroz, como hoy es necesario establecer entre los arroceros y la UTE para el uso del agua del río Negro. Ello exige un análisis de vulnerabilidad para cada producción.

Para el diseño del monitoreo, la modelación hidrológica, la predicción climática, los pronósticos meteorológicos y los caudales ecológicos, es necesario establecer una fuerte articulación entre la academia y los Servicios hidrometeorológicos y ambientales competentes, para el desarrollo de herramientas y la formación de recursos humanos que permita disponer y operar en los Servicios las tecnologías del siglo XXI. En el SNRCC se propone constituir un laboratorio con ese fin.

# 17. Riego extensivo, experiencia comercial

B. Böcking y S. Bandeira

Bernardo Böcking, Donistar S. en C., Colonia Itapebí, Salto.  
Contacto: [bbocking@adinet.com.uy](mailto:bbocking@adinet.com.uy)

Santiago Bandeira, Donistar S. en C., Colonia Itapebí.  
Contacto: [bandeira@adinet.com.uy](mailto:bandeira@adinet.com.uy)

## 17.1. Presentación de la empresa

Donistar S. en C. (DSC) es una empresa arrocera que planta en el orden de 1.500 a 2.000 ha de arroz por año. Está inserta en una empresa ganadera y participa por ende, en la rotación agrícola ganadera de esta empresa. La agricultura, en este contexto, tiene un destacado rol en la estabilidad de la producción forrajera y granos para suplementación, y por otro lado, en la diversificación de rubros.

La combinación de rubros (rotación agrícola ganadera) se realiza con criterios conservacionistas, buscando un sistema de producción sostenible en el tiempo. El cuidado del ambiente donde se desarrollan las prácticas productivas es clave en este sentido, dado que el uso del recurso suelo es relativamente intensivo y con riego en un porcentaje considerable de la rotación (tanto en cultivos arroceros, como maíz, sorgo y eventualmente pasturas). En líneas generales, la secuencia de cultivos es de 2 años de arroz, 1 año de otro cultivo de verano y de 3 a 4 años de praderas. Anualmente se pretende regar los cortes de arroz, el corte de cultivo de verano y algo de la pradera, pero esto está sujeto a la disponibilidad de agua en las represas a mediados de la primavera.

**Ubicación:** El establecimiento se ubica en el departamento de Salto a 75 km. de la ciudad de Salto por ruta 31 en el paraje Colonia Itapebí.

## Recursos disponibles:

### Suelos

Los suelos del establecimiento corresponden a la unidad Itapebí-Tres Árboles de la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay (escala 1:1.000.000). En el establecimiento se intercalan suelos superficiales (menos de 30 cm de horizonte A), con suelos profundos, aptos para agricultura (suelos profundos con aptitud de uso clase A y B según la clasif. del MGAP, donde se desarrolla la actividad agrícola). Los suelos dominantes en el área agrícola son Vertisoles y Brunosoles (suelos de alta fertilidad, donde se desarrolla la rotación, Cuadro 1), y como accesorio Litosoles de menos de 25 cm de profundidad (asociados a distintos grados de pedregosidad).

### Agua

La siembra de arroz posibilitó la inversión en represas y canales para riego. Esta inversión beneficia un área de 4.000 ha de tierras aptas para agricultura. Además se cuenta con permisos o tomas de agua sobre el río Arapey, con sistemas de riego instalados y electrificados.

El cultivo de arroz posibilitó montar la infraestructura de almacenamiento y conducción de agua. Las condiciones de suelos y clima determinan un gasto de agua excesivo sino se con-

**Cuadro 1.** Análisis de los suelos dominantes en el área agrícola.

pH(H <sub>2</sub> O)	M.O.	P Bray 1	P Cítrico	Textura			K	CIC (pH7)	Bases Tot.	% Sat.
	%	ppm	ppm	Arena	Limo	Arcilla				
5,9	6,5	4,7	15	25	40	35	0,7	36,5	30,2	82,7

trola adecuadamente el riego, esto llevó a que la empresa destinara recursos técnicos y financieros para buscar alternativas de manera de bajar el gasto de agua, mejorar la eficiencia del uso de este recurso y por otro lado asegurar los rendimientos.

### **Equipos e implementos**

Se dispone de equipos específicos para la sistematización del cultivo de arroz, y por ende aptos para sistematizar riegos por superficie, con distinta metodología (equipos de nivelación láser, taiperas, landplane, traillas para mantenimiento de represas y canales, etc.)

### **Recursos humanos**

Técnicos permanentes que cuenta la empresa para llevar adelante la planificación y manejo del riego: Santiago Bandeira, Juan Carnelli, Alejandro Castro, Juan Pablo Henderson, Ricardo Ceriani y Martín Rodríguez.

Además se cuenta con el apoyo de la Facultad de Agronomía y el INIA, donde se desarrollan trabajos de tesis de grado con la participación de profesores de la Estación Experimental Mario Cassinoni (Paysandú) de la Facultad de Agronomía, y técnicos del INIA Tacuarembó y Las Brujas, así como también se ha contado con la participación de estudiantes de postgrado de la Universidad Federal de Santa María (UFMS, Brasil).

Aguadores, la empresa cuenta con 4 personas permanentes desde hace 17 años y también hay un grupo de zafrales de 10 operarios que trabajan desde hace 6 años en la empresa donde han recibido capacitación continua en el tema para la tarea que se les asigna dentro del riego.

---

## **17.2. Necesidades de agua y riego**

En líneas generales, tanto cultivos como pasturas, tienen periodos de déficit hídrico durante el verano, estos podrán ser o no severos y por lo tanto, afectar la producción en mayor o menor medida. Inclusive en años con elevadas precipitaciones o con registros promedio de lluvias, la distribución de las mismas no se ajusta a la evapotranspiración (ET) de las plantas o requerimientos hídricos de los cultivos, y sumado a que la capacidad de almacenamiento de los sue-

los no es suficiente, se generan también periodos de déficits.

Las altas temperaturas del verano y escasa capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, genera una necesidad de lluvias correctamente distribuidas, si se pretende producir a los máximos potenciales (tanto pasturas como granos). La errática distribución de las lluvias (además de lo impredecible de las mismas) genera déficits e inestabilidad en el sistema. En la zona de basalto, a las condiciones climáticas extremas, se le suma la presencia de arcillas expansivas que se contraen y agrietan, lo que aumenta sensiblemente la evaporación directa del agua almacenada en los suelos sin ser usada por las plantas. Por otro lado, las lluvias cuando se registran en verano tienen una intensidad alta y lo que realmente se aprovecha o infiltra al suelo es en promedio 70-80%, el resto escurre superficialmente y no recargan completamente el perfil (la infiltración promedio de los suelos al expandirse las arcillas es baja).

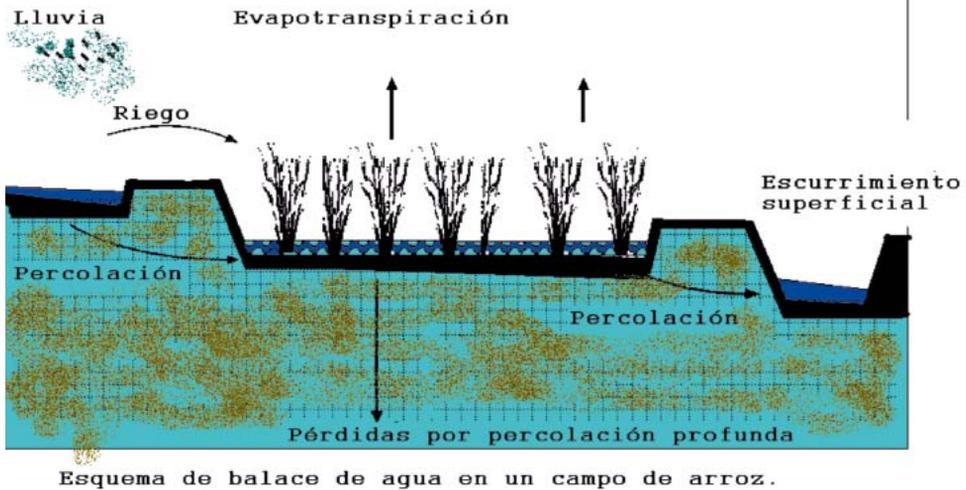
### **Arroz**

El cultivo de arroz en el Uruguay es con riego. El método que se emplea habitualmente es por inundación permanente dado que está adaptado (presenta un tejido aerénquima para oxigenar raíces) a ese medio, lo que le permite competir mejor con malezas, usar la lámina de agua como buffer de temperaturas y naturalmente cubrir la ET del cultivo. El cultivo de arroz, posibilitó el aprendizaje de la empresa en el uso del agua (almacenamiento y distribución):

Con los manejos tradicionales de riego que empleaba la empresa (inundación permanente) se registraban excesivos gastos para la disponibilidad de agua o inversión realizada. Los volúmenes de agua almacenados para riego de arroz con un manejo de inundación en las condiciones donde opera la empresa, no eran suficientes, por lo que este cultivo durante los primeros años por más de tener una inversión en almacenamiento de agua tendiente a cubrir las necesidades hídricas de todo el cultivo (ciclo), terminaba dependiendo de las lluvias durante el verano para reponer el agua en las represas. Se gastaba más agua de la que reservábamos al inicio de cada zafra.

El movimiento del agua en la chacra de arroz incluye la ET del cultivo (único gasto de agua

**Figura 1.** Esquema de balance de agua en un campo de arroz.



productivo, lo que pasa por la planta), son las pérdidas por percolación profunda (no siempre está presente el horizonte Bt y/o escurrimiento superficial y sub – superficial).

Atendiendo a ese gasto excesivo de agua, se propuso ajustar la metodología de riego a las demandas del cultivo y características de suelos. Se comenzó evaluando las ineficiencias y pérdidas de agua con el objetivo de minimizarlas en la medida de lo posible y prever el agua ineficiente en caso de no poder eliminarlas. Se pretende aportar con el riego, la lámina que evapotranspira el cultivo y la porción de agua generada por las ineficiencias del sistema (evaporación directa de agua en lagos, canales y chacras, infiltración en canales, etc.). El control de malezas, se efectúa con el uso correcto de herbicidas (producto, dosis y momento debidamente seleccionados), asegurando con el riego una alta tasa de crecimiento del cultivo de arroz para que cubra rápido el suelo, pero al no contar con la inundación permanente, se corre el riesgo de nuevas emergencias de malezas (la inundación y falta de oxígeno en el suelo, impiden la germinación de semillas de malezas).

### **Ganadería**

La ganadería es el rubro más sensible en cuanto a la incertidumbre de disponibilidad de agua y/o registros de lluvia. En líneas generales la producción de forraje en invierno es algo más

estable al haber especies invernales adaptadas y de buen aporte forrajero. En el verano, la producción ganadera se basa en la dilatación de exceso primaveral. La erraticidad de lluvias, escaso volumen de agua almacenado en el perfil del suelo y las altas demandas atmosféricas, hacen que predominen los años con déficit hídricos por períodos prolongados o bien con déficits puntuales, que dependiendo del ciclo de las pasturas o cultivo, pueden afectar sensiblemente la producción tanto de forraje como de grano. La incorporación del riego en este rubro permite estabilizar la producción ganadera, viabilizando la diversificación de la empresa.

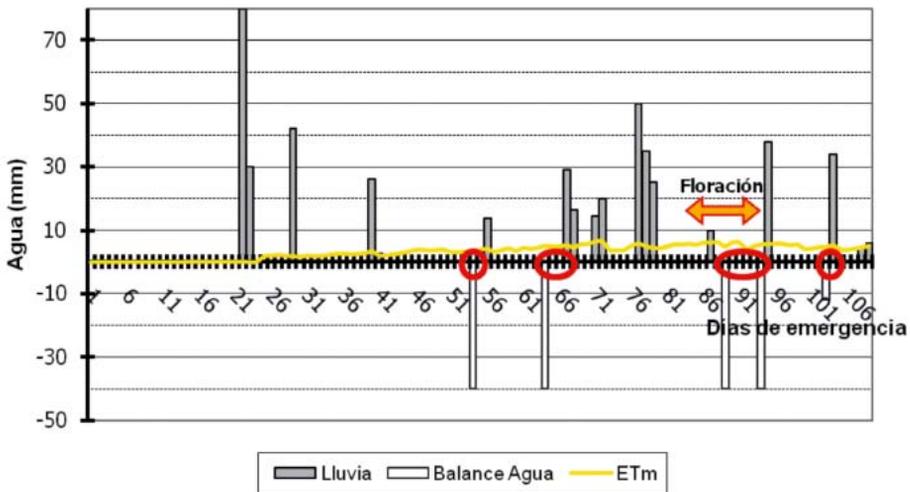
Se presentan a continuación ejemplos concretos de la disponibilidad de agua para distintos cultivos extensivos que ha manejado la empresa en zafra anteriores en conjunto con el INIA y la Universidad Federal de Santa Maria.

### **Maíz**

El objetivo de este cultivo es suministrar alimento para el engorde de novillos, bien cosechando grano o la planta entera. La zafra 06/07 se sembraron 250 ha de maíz para cosechar con destino a planta entera.

La emergencia del cultivo fue el 8 de octubre. Durante su desarrollo, en los 110 días que se controló, evapotranspiró 352 mm (figura 2). Durante el mismo período, se registraron 476 mm de lluvia, suficiente como para satisfacer las

**Figura 2.** Balance hídrico para el cultivo de maíz (zafra 2006/07).

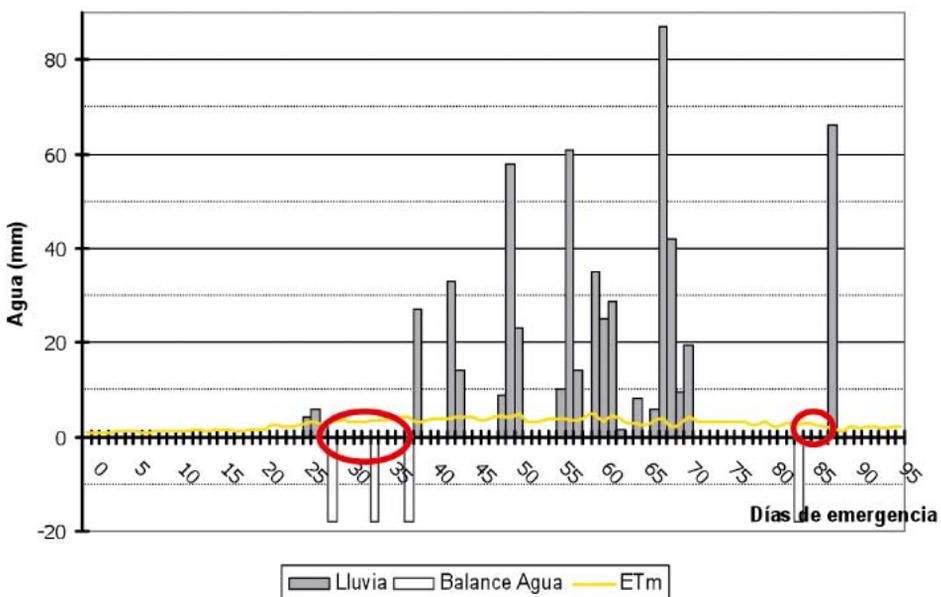


necesidades hídricas del cultivo. Sin embargo el balance hídrico diario en el suelo determinó 4 períodos (de una semana cada uno) con déficit marcados de agua disponible en el suelo para asegurar óptimo desarrollo del cultivo. La recomendación de riego para cubrir esos déficits fue de 360 mm (la misma tiene en cuenta una eficiencia de 70% en conducción y distribución de agua). Se grafica a continuación, para todo el ciclo del cultivo, las lluvias registradas (barras +), la ET del cultivo y los déficits generados (barras -). Uno de los períodos de déficit hídrico coincidió con la floración del cultivo (período crítico).

### Sorgo

Cultivo con destino a grano para engorde de novillos (grano húmedo). La zafra 06/07 se sembraron 400 ha de sorgo, de las cuales se regaron

**Figura 3.** Balance hídrico para el cultivo de sorgo (zafra 2006/07).



90 ha. La emergencia de las 90 ha a regar (promedio del área) fue el 28 de diciembre y muy mala, se tuvo que sembrar un porcentaje importante del mismo por la mala implantación a consecuencia de las lluvias de noviembre y diciembre. El cultivo durante los 90 días de ciclo que se controló la demanda de agua, evapotranspiró 268 mm. Durante el mismo período se registraron 589 mm de lluvia, sin embargo el balance hídrico en el suelo determinó 2 períodos con déficit marcados de agua disponible en el suelos para asegurar óptimo desarrollo del cultivo. La recomendación de riego fue de 145 mm. Se grafica a continuación para todo el ciclo del cultivos, las lluvias registradas que aportaron agua al suelo (barras +), la ET del cultivo y los déficits generados (figura 3).

### **Praderas**

Las pasturas sembradas tiene como objetivo aparte de suministrar forraje, también cosechar semilla. No se realizaron estimaciones de ET para los riegos de praderas, si se tiene estimaciones en base a registros de la UFSM y modelos. Considerando una exploración radicular de 40 cm del perfil de suelo, hay una capacidad de almacenamiento de agua según caracterización realizada, de 87 mm. De estos, solo 50 mm estarían disponibles sin ocasionar stress a las plantas (sin restricciones de crecimiento). La ET diaria media en verano (condiciones normales y máximo crecimiento) es de 5 mm. Esto determina que el agua disponible en el suelo (agua almacenada en el suelo) cubra la demanda, por periodos de 10 días.

Una pradera, para lograr un máximo crecimiento en verano, requiere en el orden de 45 – 50 mm en un período de 10 días, esto determina una necesidad de 65 mm de lluvia cada 10 días (teniendo en cuenta lo que escurre en cada lluvia y no infiltra) o su equivalente en riego (una lámina de 80 mm de agua, con un sistema de riego con 65-70% de eficiencia).

---

## **17.3. Metodologías de riego**

### **Tipos de riego y características destacables:**

#### **1. Superficial**

DSC ha desarrollado el conocimiento y ajustado las técnicas de riego (con la colaboración de INIA, UFSM, literatura internacional, etc.) en el cultivo de arroz, lo que permitió luego, adaptar-

las para aplicarlas para riego de otros cultivos. El riego por superficie, demanda mucho trabajo, técnico (en controles y seguimientos), y de personal (RRHH, para ejecución de actividades). Es poco 'automatizado' y difícil de automatizar, lo que lo hace muy dependiente del operario. Se ha registrado una gran variabilidad de los resultados obtenidos por la falta de técnicas adaptadas localmente (dificultada en asegurar gastos de agua y ajustar *timing* o momento del riego con necesidad cultivo. Como características positivas, se destaca la baja inversión necesaria, y en sistemas arroceros, permite utilizar recursos existentes para el cultivo de arroz (represas y canales, RRHH, implementos, etc.) para regar otros cultivos.

### **2. Aspersión**

La alta demanda de mano de obra del riego por superficie, llevó a que se destinara un área del cultivo más relevante a regar por medio de un pivot. Hay poca experiencia en la empresa con esta metodología.

La inversión y el costo de funcionamiento del equipo, es alta. Pero por otro lado, se destaca la simplicidad en el manejo y bajo requerimiento de RRHH.

### **Definición del método de riego**

El objetivo principal al momento de regar, es ajustar gasto de agua de cada sistema con la evapotranspiración potencial (ETP) del cultivo a regar (incluyendo ineficiencias controladas o minimizadas). Esto se debe llevar a cabo con criterios de alta eficiencia en el uso del agua por el alto costo de este recurso y mayores 'costos' ante el uso incorrecto del mismo (costos no efectivos, como erosión de suelos, escurrimientos, riesgo de contaminación de cañadas y arroyos, etc.). Es imprescindible contar con personal debidamente capacitado y conciente de lo que está manejando.

En la implementación de un sistema de riego se tiene en cuenta:

#### **1. Cultivo a regar y la demanda de agua**

Se inicia con una base teórica de la ET para diseñar el sistema y luego con el monitoreo se ajustan los gastos a la ET de la zafra. La empresa cuenta con una estación meteorológica automá-

tica donde tiene la posibilidad de realizar los cálculos localmente de evapotranspiración. El crecimiento del cultivo se monitorea periódicamente para ajustar el modelo de crecimiento con la realidad y ajustar las estimaciones de ET (pueden generarse otras restricciones de crecimiento por nutrientes, malezas, plagas, etc.).

## 2. Caracterizar suelo a regar

Es parte del servicio de riego. Mediante el método de doble anillo se determina la infiltración básica y con muestreo de anillos de 100 cc se determina en laboratorio la curva característica de agua en el suelo.

Los datos en los suelos del establecimiento van de 2 a 10 mm/hr de infiltración básica. Este dato es importante en el diseño de los sistemas y/o para mejorar sistemas 'viejos'.

## 3. Medir gastos de agua en los canales y represas

El sistema de riego apropiado se define con la información anteriormente citada de suelos, cultivo, gastos, etc. Éste varía según el cultivo y método de cosecha, suelos, topografía, etc.

## Metodología empleada de riego por superficie

### • Arroz

El método de riego es la inundación intermitente. El arroz es el cultivo que permite disponer de agua para regar otros cultivos o pasturas en verano. Se pretende implementar un método que minimice las pérdidas de agua. Se trata de evitar el escurrimiento superficial y minimizar la percolación profunda. Es imprescindible controlar los gastos en todo momento y medir los caudales. Las chacras deben estar sistematizadas correctamente teniendo en cuenta los objetivos de riego y los aguadores debidamente entrenados.

En cada zafra, se definen parcelas pequeñas a modo de melgas testigo o referencia, donde se hace un seguimiento detallado empezando por mapeos, medición de áreas (unidades de riego), caudales dentro de la melga, tiempos de aplicación de lámina, etc.; para que sea el área de ensayo y de ajuste de cada aguador, y mejorar el manejo del resto del área.

### • Maíz y Sorgo

Inicialmente, se implementó el método de riego por fajas (Border Strips), ante la necesidad de mejorar el desempeño del aguador y minimizar la erosión de las conducciones internas, se pasó al riego por surcos con mangas para la distribución.

Para el maíz, se estimó la demanda con el programa Cropwater (FAO). Dependiendo de la fecha de siembra y considerando los registros climáticos de INIA Salto Grande (registros de 30 años) se generarían déficits del orden de los de 320 a 350 mm de riego a intervalos de 5 días. Teniendo en cuenta las propiedades hídricas del suelo, topografía y necesidades de agua, se definió la sistematización del cultivo.

La propuesta de riego por fajas, básicamente consistía en:

- Fajas de 12 m de ancho
- Largo de fajas de 70 m
- Pendiente máxima (pendiente del terreno de 1,1 a 2%)

Se determinó las características de avance del agua antes de la siembra, Q de cada faja y tiempo de riego (se determina la lámina de agua [L, mm]).

$$Q \text{ (l/s)} = (0.000357 \times L \times S^{0.5}) / 10$$

En estas condiciones, el riesgo de erosión es BAJO.

Caudal de agua que ingresa a cada faja es de 7 a 10 l/s (0.58 – 0.83 litro por metro de ancho de faja). Tiempo de riego por faja, 80 minutos, aplicándose así una lámina de 40 mm. En este tiempo (80 minutos) se debe haber alcanzado el 70 % del largo de la faja, el 30 % restante se riega con el agua que va bajando de la faja.

Las conducciones de agua interna (dentro de la chacra) se hacen por medio de regaderas. Las regaderas principales se marcan sin tener en cuenta la pendiente, y se prioriza que abastezca correctamente en tiempo y forma a las regaderas secundarias. Se controla la erosión con bolsas, mangas, etc. Las regaderas secundarias, las que entregan el agua a las fajas, tienen una pendiente (s) de 1 por mil. La distancia entre regaderas

es de 70 m, el ancho =  $\pm 2$  m y la altura de la pierna o taipa =  $\pm 0.3$  m.

Los recursos humanos, se distribuyen:

- canaero, quien se asegura de entregar el mismo caudal a cada faja y por lo tanto a cada regador. Abarca generalmente, unas 150-200 ha, hasta 10 aguadores
- regador que controla que el agua se esté distribuyendo correctamente (uniformidad) en la faja. También es el que indica el cambio de faja al llegar el tiempo. Es, en definitiva, quien se asegura de distribuir correctamente el agua en el área asignada. Un regador capacitado, abarca unas 25 ha de riego.

La propuesta de riego por surcos, básicamente consistía en:

- Surcos de hasta 300 m de largo
- Con una pendiente media de 0,7% en todos los casos.
- La siembra por ende, debe respetar la dirección de los surcos.
- Los surcos deben realizarse al emerger el cultivo, para identificar las líneas. En este caso concreto, lo seco que estaba el suelo impidió que se levantaran correctamente los surcos, obligando a hacerlos después de una lluvia, con el cultivo en 4 hojas.
- Por debajo del canal principal, se tendieron mangas de 10 pulgadas (25,4 cm) a una distancia de 8 a 10 m del mismo, para lograr una carga en la manga de
- 80 cm de columna de agua (0,8 mca).
- Con esa carga, colocando ventanas plásticas y regulables (registros), se llega a un caudal máximo y homogéneo de 2 l/s. Se diseñó la sistematización primaria, como para disponer de 1 l/s por surco y regar surco por medio. Los registros se abrían hasta algo más de la mitad.
- Con estas mangas y la carga de trabajo, se logra en la cabecera de los surcos y mangas un caudal máximo de 80 l/s, lo que permite regar 80 surcos a la vez. Éstas a su vez, pueden trabajar con una válvula que generan una intermitencia en el sentido del caudal,

entre dos módulos o unidades de riego, lo que mejora sensiblemente la eficiencia del sistema.

#### • Praderas

El método de riego es por melgas o taipas. Es una combinación de métodos usados en el arroz (taipas) y el de fajas, descrito anteriormente. Se construyen taipas de más de 20 cm de altura a un intervalo vertical de 25-30 cm. La taipa se usa a modo de regadera y almacena agua hasta que empieza a desbordar. En ese momento el aguador 'boquetea' la taipa cada 7-10 m y deja bajar el agua de manera precipitada con el objetivo de lograr un frente de avance del agua homogéneo, como para realizar un correcto mojado. El objetivo es regar de una manera sencilla el 70-80% del área de la pradera.

---

## 17.4. Resultados de campo

Se resumen los resultados de chacra a nivel comercial.

### Resultados de riego en arroz

Se han realizado en el establecimiento, con el apoyo de INIA Tacuarembó y la Facultad de Agronomía de la UdelaR, 2 tesis de grado, comparando los gastos de agua del riego tradicional (con inundación permanente) y una alternativa de riego intermitente:

1. Zafra 05-06 (tesis de grado de Marela y Motta)
2. Zafra 06/07 (tesis de grado de Henderson, Gussoni y Moor)

Se obtienen ahorros significativos de agua en el riego de arroz al no inundar permanentemente la chacra. El ahorro ronda los 2 a 3.000 m<sup>3</sup>/ha (L = 300 mm). Se logra como beneficio colateral, pero muy importante minimizar el escurrimiento y pérdidas de agua y asegurar un mínimo impacto ambiental. No se han detectado mermas significativas en el rendimiento, pero es de tener en cuenta que este sistema es más sensible a errores en la distribución de agua que la inundación permanente y por ende el riesgo de no lograr altos rindes, es mayor que con el riego tradicional y lo hace una propuesta muy difícil de implementar a nivel comercial sin afectar los rendimientos.

## Resultados de riego en maíz (gastos de agua y rendimientos)

### Zafra 05/06

Se regaron 180 ha de maíz para cosecha de planta entera. Llovieron 275 mm durante el ciclo del cultivo. La ET estimada fue de 585 mm, generando un déficit hídrico de 360 mm de agua. Se aplicaron (riego) 431 mm de lámina de agua.

La cosecha en promedio rindió 33.000 kg/ha de planta entera incluyendo un área sin riego que rindió 19.300 kg/ha. Hay registros de melgas regadas con rendimientos de 38 a 41.000 kg/ha.

### Zafra 06/07

Se regaron 252 ha de maíz con destino a grano. Llovieron 476 mm en el ciclo del cultivo. La ET estimada durante los 110 días, fue de 352 mm. Como se indicó anteriormente, a pesar de disponer de lluvias suficientes (superiores a la ET), fue necesario regar y la recomendación del sistema contratado fue de realizar 4 riegos de 40 mm. El costo total del cultivo por hectárea, con precios actualizados (insumos, RRHH, maquinaria a precios de 2010) fue de U\$S 865, de los cuales 218 u\$/ha corresponden al riego.

Sistematización: 104 u\$S/ha

Riego (aguadores): 62 u\$S/ha

Agua: 52 U\$S/ha.<sup>3</sup>

**Total costo maíz regado: 839 u\$S/ha**

Indicadores de riego de maíz por fajas:

Se logró regar las 250 ha en 12 días, empleando 8 aguadores (31 ha por aguador) y 220 l/s. Se aplicó en promedio 104 mm de lámina por baño, con una eficiencia del 54%. Se pretendía aplicar 70 mm por baño, asumiendo una eficiencia de 70%. Fue difícil ajustar los gastos a los objetivos, por lo que se evidencia claramente un punto de mejora.

Los rendimientos fueron de 8.637 kg secos y limpios de maíz por ha. Registrándose una melga de 52 ha, donde se ajustó debidamente el riego a las demandas, con un rinde medio 10.191 kg/ha.

### Zafra 07/08

No se regó por superficie, en tanto no había agua disponible.

<sup>3</sup> El precio de agua, surge del total de agua destinada a cada cultivo, referenciado al cultivo de arroz. En este caso, se corresponde a un tercio del costo del agua para arroz.

**Cuadro 2.** Indicadores de riego por fajas en el cultivo de maíz.

Indicador	Promedio
Área Riego (ha)	250
Días de riego (1 "baño")	12
ha / día	21
Caudal (lts/seg)	220
Caudal (lts/seg/faja)	8,9
Caudal (lts/seg/ha)	0,9
N° Regadores / día	8
Área por regador (ha)	31
Área por regador / día	2,6
Eficiencia de riego	54%
mm aplicados	104
Gasto de agua (m <sup>3</sup> /ha)	1.040

### Zafra 08/09

Se regaron 110 ha de maíz con destino a grano, por medio de surcos. La disponibilidad de agua en la represa no era suficiente para atender la demanda de todo el ciclo del cultivo y por ende se procuró dar o aplicar riegos estratégicos. Al inicio del cultivo, se disponía de agua como para aplicar 200 mm. Las lluvias registradas durante todo el ciclo, fueron 162 mm. La emergencia fue muy mala (el suelos estaba muy seco, por lo que no había humedad suficiente para 'mover' la semilla, ni para hacer los surcos para riego) y luego de 42 mm de lluvia sobre fines de octubre se pudo enlazar y dar luego el primer baño de 120 mm. Posteriormente se aplicaron los 60 mm que quedaban en la represa (se había evaporado el resto directamente del lago de la represa) al inicio de la floración, pero muy mal distribuidos.

Indicadores de riego de maíz por surcos:

Se logró regar las 110 ha en 5 días, empleando 3 aguadores (37 ha por aguador) y 80 l/s. Se aplicó en promedio 120 mm de lámina en el primer baño, con una eficiencia menor al 40%. El segundo riego se aplicó el agua disponible en la represa, tan solo 60 mm.

A pesar de haber aplicado casi 200 mm de riego, no se pudo cubrir el déficit de agua. El rendimiento se vio afectado y se cosecharon 5.260 kg/ha. Cabe destacar que todas las áreas que no

**Cuadro 3.**  
Indicadores de riego por surcos en el cultivo de maíz.

Indicador	Promedio
Área Riego (ha)	110
Días de riego (1 "baño")	5
ha/día	22
Caudal (lts/seg)	80
Caudal (lts/seg/SURCO)	1,0
Caudal (lts/seg/aguador)	27
Caudal (lts/seg/ha)	0,7
N° Regadores / día	3
Área por regador (ha)	37
Área por regador / día	7
Regadores / ha	0,03
Eficiencia de riego %	40
mm aplicados	120
Gasto de agua (m <sup>3</sup> /ha)	1.200

se regaron, se destinaron a corte como planta entera para evitar la pérdida total cultivo.

### Resultados de riego en praderas (2 melgas en 05/06)

El gasto de agua para regar pasturas, en general es excesivo (generalmente se toma la decisión de regar con el suelo muy seco), promediando los 250 mm por baño de lámina aplicada. En todos los casos se aseguró la persistencia de plantas durante la seca 05-06, además de lograr 2 pastoreos y una rápida re-implantación en febrero (otoño temprano con las lluvias, se aseguró un buen banco de semilla). No se midieron crecimiento de las pasturas o ms.

Costos actualizados:

- Sistematización: 56 u\$s/ha
- Riego (aguadores): 38 u\$s/ha

Agua: No se reserva agua para este fin al inicio y se destina agua de lluvia que escurre a las represas durante el verano. La inversión y costos por el almacenamiento de agua se la carga al arroz y/o maíz o sorgo.

**Total costo riego: 94 u\$s/ha + agua**

**Cuadro 4.** Indicadores del riego en el cultivo de sorgo.

Indicador	Promedio
Área Riego (ha)	90
Días de riego (1 "baño")	6
ha/día	15
Caudal (lts/seg)	130
Caudal (lts/seg/faja)	7,3
Caudal (lts/seg/ha)	1,4
N° Regadores / día	4
Área por regador (ha)	22,5
Área por regador / día	3,8
Eficiencia de riego %	47
mm aplicados	75
Gasto de agua (m <sup>3</sup> /ha)	750

### Resultados de riego en sorgo (gastos de agua y rendimientos, 06/07)

Para el riego de 90ha de sorgo, se generaron costos (actualizados al 2010) de:

- Sistematización: 95 u\$s/ha
- Riego (aguadores): 30 u\$s/ha
- Agua: 39 u\$s/ha<sup>4</sup>

**Total riego: 164 u\$s/ha.**

Indicadores de riego de Sorgo:

Se logró regar las 90 ha en 6 días, empleando 4 aguadores (22,5ha por aguador) y 130 l/s. Se aplicó en promedio 75 mm de lámina por baño, con una eficiencia del 47%. Se pretendía aplicar 50 mm por baño, asumiendo una eficiencia de 70%, cubriríamos los 35mm de ET del sorgo en ese período. Los gastos de agua en líneas generales se ajustaron a los objetivos lográndose valores razonables de eficiencia del uso del agua.

<sup>4</sup> El agua asignada a sorgo corresponde a un cuarto del total asignado al arroz.

Los rendimientos fueron del orden de los 3.600 kg/ha. Se registraron mermas de grano por exceso lluvia fin de feb-mar (vuelco).

---

### **17.5. Demandas y necesidades de la empresa**

Es necesario ajustar las tecnologías y métodos de riego a aplicar en cada situación. Para esto, se necesita capacitar a técnicos y personal u operarios y así lograr un uso eficiente del recurso

agua y maximizar los beneficios del uso de esta herramienta (el riego). Se necesita también ajustar metodologías a las condiciones locales según (tipos de suelos, topografía, etc).

Por otro lado, el control de malezas y fertilización en el nuevo escenario (con disponibilidad de agua suficiente) debiera ser adaptado. En este nuevo ambiente, la problemática de estas variables cambia, por lo que hay que adecuar el paquete tecnológico de insumos que se emplea habitualmente a esta nueva situación.

# Bibliografía

## Capítulo 1

- BAETHGEN, W.E. 2010. *Climate Risk Management for Adaptation to Climate Variability and Change*. *Crop Sci.* 50(2):70-76
- BAETHGEN, W.E. 2001. "The Experience of Southeastern South America (Mercosur Region)". IN: *Coping with the Climate: A Way Forward*. International workshop, October 16 - 20, 2000, Pretoria, South Africa. IRI Publication IRI-CW/01/1. Palisades, NY.
- BAETHGEN, W.E. 1997. *Vulnerability of the agricultural sector of Latin America to climate change*. *Climate Res.* 9:1-7
- BAETHGEN, W.E. y G.O. MAGRIN. 1995. "Assessing the impacts of climate change on winter crop production in Uruguay and Argentina using crop simulation models". IN: C. Rosenzweig et al. (eds.), *Climate Change and Agriculture: Analysis of Potential International Impacts*. American Society of Agronomy Special Publication 59, Madison WI, pp. 207-228.
- BAETHGEN, W.E., H. MEINKE y A. GIMENEZ. 2004. "Adaptation of agricultural production systems to climate variability and climate change: lessons learned and proposed research approach". IN: *Insights and Tools for Adaptation: Learning from Climate Variability*, NOAA-OGP, Washington, D.C. ENV/EPOC/GF/SD/RD, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.
- BERBERY, E.H., M. DOYLE y V. BARROS (2006). Tendencias regionales de precipitación. El cambio climático en la Cuenca del Plata. Eds. V. Barros, R. Clarke y P. Silva Dias. Capítulo 5, pp. 67-79.
- IPCC, 2007a. "Intergovernmental Panel on Climate Change". Working Group I Contribution of to the Fourth Assessment Report, Climate Change 2007: *The Physical Science Basis*, Summary for Policymakers. <http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>
- IPCC, 2007b. "Intergovernmental Panel on Climate Change". Working Group II Contribution to the Fourth Assessment Report, Climate Change 2007: *Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Summary for Policymakers <http://www.ipcc.ch/SPM6avr07.pdf>
- PARRY, M. L. y C. ROSENZWEIG. 1994. "Potential impact of climate change on world food supply". *Nature*, Vol. 367 (133-138).
- PARRY, M. L.; C. ROSENZWEIG, A. IGLESIAS, M. LIVERMORE y G. FISCHER. 2004. "Climate Change Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios". *Global Environmental Change* (14) 53-67
- ROSENZWEIG, C. Y A. IGLESIAS (Eds.)1994. "Implications of Climate Change for International Agriculture". *Crop Modeling Study*. USEPA, 230-B-94-003, Washington, D.C.
- SCHNEIDER, S.; J. SARUKHAN; J. ADEJUWON; C. AZAR; W.E. BAETHGEN; C. HOPE; R. MOSS; N. LEARY; R. RICHELIS y J.P. VAN YPERSELE. 2001. "Overview of Impacts, Adaptation, and Vulnerability to Climate Change". pp 75-103. IN: *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, (McCarthy, J. J., Canziani, O., Leary, N. A., Dokken, D. J. and White, K. S. Eds.). Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press.
- TEBALDI, C.; HAYHOE, K., ARBLASTER, J. M. y MEEHL, G. A. 2006. "Going to the extremes: An

intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events". *Climatic Change*, Vol. 79, pp. 185-211.

## Capítulo 2

ALLAN JONES C., BLAND W., RITCHIE J., WILLIAMS, J. 1991. "Simulation of root growth". In: Hanks, J., Ritchie, J.T. (Eds.), *Modeling Plant and Soil Systems*. Agron. Monogr. 31, ASA, CSA, and SSSA, Madison, pp. 91-124.

AQUASTAT-FAO. 2000. "El riego en América Latina y el Caribe en cifras". *Informes sobre temas hídricos* N° 20. Roma, Italia

CANTARERO M., DARDANELLI J., DE LUCA M., COLLINO D., ABBATE P. y RACCA R. 2008. "Patrones de absorción de agua edáfica en diferentes cultivares de trigo en un suelo haplustol típico". *XIII Reunión Latinoamericana y XXVIII Reunión Argentina de Fisiología Vegetal Rosario*, 21-24/09/08. p. 57.

COLLINO D, DARDANELLI J., SERENO R. y RACCA. 2000. "Physiological responses of argentine peanut varieties to water stress: water uptake and water use efficiency". *Field Crops Res* 68: 133-142

COLLINO D, DARDANELLI J., DE LUCA M., RACCA R. 2005. "Temperature and water availability effects on radiation and water use efficiencies in alfalfa". *Aust. J. Exp. Agric.* 45: 383-390.

DARDANELLI J., DE LA CASA A., ATECA M., ZANVETTOR R., NÚÑEZ VÁZQUEZ F. y SALAS H. 1992. "Validación del balance hidrológico versátil para la rotación sorgo-soja bajo dos sistemas de labranza". *Revista Agropecuaria de INTA Manfredi e INTA Marcos Juárez*. 7(2):20-29.

DARDANELLI J., BACHMEIER O., SERENO R. and GIL R. 1997. "Potential soil water extraction parameters for several crops in a silty loam soil". *Field Crops Res*. 54: 29-38.

DARDANELLI J. 2002. "Relaciones hídricas y el cultivo de maíz". En: Maíz. *Cuaderno de Actualización Técnica* N° 65. AACREA. pp 18-25.

DARDANELLI J. and COLLINO D. 2002. "Estimation of the water table contribution to

alfalfa crops in the Argentinean Pampa Region". *Agriscientia*. XIX: 11-18.

DARDANELLI J. y ANDRIANI J. 2003. "La disponibilidad hídrica y la respuesta del cultivo de soja". En: *El libro de la soja*. Cuaderno de Actualización Técnica N° 66 AACREA. Revista Técnica AAPRESID: Soja en siembra directa. Coord Ed E. Satorre. pp. 107-118

DARDANELLI J., CALMON M., JONES J., ANDRIANI J., DÍAZ M. and COLLINO D. 2003. "Use of a crop model to evaluate soil impedance and root clumping effects on soil water extraction in three Argentine soils". *Trans. of the ASAE* 46(4): 1265-1275.

DARDANELLI J., RITCHIE J., CALMON M., ANDRIANI J. and COLLINO D. 2004. "An empirical model for root water uptake". *Field Crops Res*. 87(1):59-71.

DURÁN A., CALIFRA A. Y MOLFINO J. 1999. "Suelos del Uruguay según Soil Taxonomy".

FEOLI C., HALL A., INGARAMO J Y BALZARINI M. 2010. "Brechas: Variación inter-zonal e interanual de las diferencias entre rendimientos de girasol alcanzables y logrados". El Proyecto ASAGIR. 5° Congreso Argentino de Girasol, Buenos Aires, 1-2 junio 2010.

GIL R. 1994. "Crecimiento radical de la soja en un suelo Haplustol Entico del centro de la provincia de Córdoba: efecto de la humedad y de la resistencia mecánica del perfil del suelo". Tesis Magister Scientiae. Post-grado en Ciencias del Suelo. FAUBA, Argentina

HALL A., REBELLA C., GHERSA C. AND CULOT, J. 1992. "Field-crop systems of the Pampas". In: Pearson, C.J. (Ed.). *Ecosystems of the World: Field Crop Ecosystems*. Elsevier, Amsterdam, pp. 413-449.

HAMBLIN A. and TENNANT D. 1987. "Root length density and water uptake in cereals and grain legumes: How well are they correlated?". *Aust. J. Agric. Res*. 38: 513-527.

HARO R., OTEGUI M., COLLINO D. and DARDANELLI J. 2007. "Seed Yield Determination and Radiation Use Efficiency in Irrigated Peanut Crops: Response to Temperature and Source-Sink Ratio Variations". *Field Crops Res*. 103: 217-228.

- HARO R., DARDANELLI J, COLLINO D. and OTEGUI M. 2010. "Water deficit and impaired pegging effects on peanut seed yield: links with water and photosynthetically active radiation use efficiencies". *Crop and Pasture Sci.* 61: 343-352.
- IMBELLONE P., GIMÉNEZ J. y PANIGATTI J. 2010. "Suelos de la Región Pampeana". Capítulo 5: procesos de vertisolización: pp. 211-258. Ed. INTA.
- INTA-PNUD. 1990. "Atlas de Suelos de la República Argentina". Tomos I y II. Buenos Aires, Argentina: SAGYP.
- LEE K, SINGH P, WANI S., REGO T., TRIMURTULU, N., MONTEITH, J. 1996. "Effects of fertilizer nitrogen and irrigation on root growth, and water uptake with special reference to post-rainy season sorghum". In: Ito, O., Johansen, C., Adu-Gyamfi, J.J., Katayama, Kumar Rao, J.V.D.K., Rego, T.J.(Eds.), *Dynamics of Roots and Nitrogen in Cropping Systems of Semi-arid Tropics*, Proceeding of International Workshop. Sponsored by JIRCAS and ICRISAT. JIRCAS International Agriculture Series No. 3, November 21-25, 1994. pp. 261-271.
- LÓPEZ A., DARDANELLI J., COLLINO D., SERENO R. y RACCA R. 1997. "Efecto del grado de reposo invernal sobre la producción, consumo y eficiencia en el uso del agua en alfalfa cultivada bajo riego". *RIA.* 28(2): 41-48.
- JONES J., BOOTE K., JAGTAP S., AND MISHOE J. 1991. "Soybean development. In Modeling Plant and Soil Systems", 71-90. R. J. Hanks and J. T. Ritchie, eds. *Agronomy Monograph* 31. Madison, Wisc.: ASA, CSSA, and SSSA.
- MARTELLOTTA E., SALINAS A., LOVERA E., SALAS P, ALVAREZ C., GIUBERGIA J. y LINGUA S. 2005. "Inventario y caracterización del riego suplementario en la provincia de Córdoba". *Boletín N° 10.* Ediciones INTA
- MARTELLOTTA E., SALINAS A., LOVERA E., BOCCARDO M., GIUBERGIA J., RAMPOLDI A. y ALVAREZ C. 2010. "Calidad de las aguas subterráneas para riego suplementario en la Provincia de Córdoba". Proyecto Nacional de Riego Suplementario en cultivos extensivos (En prensa).
- MONTEITH J. 1986. "How do crops manipulate water supply and demand?" *Phil. Trans. R. Soc. London. A.* 316: 245-259.
- PASSIOURA J. 1983. "Roots and drought resistance". *Agric. Water Manag.* 7: 265-280.
- RACCA R, COLLINO D, DARDANELLI J, BASIGALUP D, GONZÁLEZ N, BREZONI E, HEIN N y BALZARINI M. 2001. "Contribución de la fijación biológica de nitrógeno a la nutrición nitrogenada de la alfalfa en la región pampeana". INTA (Ed.), Bs As, 56 p.
- RATCLIFF L., RITCHIE J. and CASSEL D. 1983. "Field-measured limits of soil water availability as related to laboratory-measured properties". *Soil Sci.* 47: 764-769.
- SCOPPA C. y PAZOS S. 1981. "Caracterización integral y análisis pedogenético de molisoles del borde sur de la pampa deprimida". *Revista de Investigaciones Agropecuarias RIA, INTA.* 16(1): 43-63.
- SONGSRI P., JOGLOY S., VORASOOT N., AKKASAENG C., PATANOTHAI A. and HOLBROOK C. 2008. "Root Distribution of Drought-Resistant Peanut Genotypes in Response to Drought". *Journal of Agronomy and Crop Sci.* 194(2): 92-103.
- TARDIEU F. 1994. "Growth and functioning of roots and of root systems subjected to soil compaction: Towards a system with multiple signaling Soil and Tillage Research". 30 (2-4): 217-243.
- VARGAS GIL J. 1973. "Génesis de los suelos agrícolas de las series Mar del Plata y Balcarce: Estudio micromorfológico". *Revista de Investigaciones Agropecuarias RIA, INTA. Serie No. 3, Clima y Suelo.* 10(2): 81-109.
- WILLIAMS J. and BOOTE K. 1995. Physiology and modelling-predicting the "unpredictable legume". In: Pattee, H.E., Stalker, H.T. (Eds.), *Advances in Peanut Science. Am. Peanut Res. Educ. Soc. Inc., Stillwater, OK,* pp. 301-353.

---

### Capítulo 3

- ANDRADE, F.H., CIRILO A.G., UHART S.A. y OTEGUI M.E. 1996. "Requerimientos hídricos". En: *Ecofisiología del cultivo de Maíz.* 1ª Ed. Editorial La Barrosa. Dekalb Press y CERBAS-EEA INTA Balcarce(Ed). Balcarce, Argentina. 121-146 pp.
- ANDRADE, F.H.; AGUIRREZÁBAL, L. y RIZALLI, R.H. 2000. "Crecimiento y rendimiento com-

parados”. En: F.H. Andrade y V.O. Sadras (eds.) *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. Editorial Médica Panamericana S.A. Argentina. 61-96 pp.

FEHR, W.R. and CAVINESS, C.E.1977. “Stages of soybean development”. *Special Report* 80. Iowa State University, Ames, Iowa. 11 pp.

GIMÉNEZ, L. y GARCÍA PETILLO, M. 2009. “Estudio de las necesidades hídricas de los cultivos de verano en Uruguay”. 1º Simposio de Agricultura de secano. Facultad de Agronomía.

HOFSTADTER, R. 1983. “Producción de maíz, alfalfa y trébol blanco en condiciones de riego”. *Agua en la Agricultura*. 1:7-13.

KANTOLIC, A.G.; GIMÉNEZ P.I. y DE LA FUENTE E.B. 2003. “Periodo crítico para la definición del rendimiento”. En: *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo*. Satorre, R.L. Benech, G.A. Slafer, E.B. de la Fuente, D.J. Miralles, M.E. Otegui y R. Savin. Facultad de Agronomía. U.B.A. Argentina. 189-192 pp.

ROSELLI, S. y TEXEIRA, J. 1998. “Efecto del manejo del agua de riego sobre las características productivas de maíz para grano”. Tesis. Facultad de Agronomía.

SAWCHIK, J. y CERETTA S. 2005. “Consumo de agua por sojas de distintos grupos de madurez en diferentes ambientes de producción”. Jornada Técnica de Cultivos de Verano. *Serie de Actividades de Difusión* INIA. La Estanzuela. 41-45 pp.

---

## Capítulo 4

ABRAHAM M., GRAMICCI, J. 2007. “Riego en Argentina” (2º aproximación). Distribución del área regada a escala provincial y regional.

ABRAHAM M., GRAMICCI, J. 2007. “Riego en Argentina al año 2002” Distribucion del area regada a escala provincial y departamental en [http://www.minagri.gob.ar/SAGPyA/agricultura/agua\\_y\\_suelos/03-riego/T%201%20Riego%20a%20nivel%20país.pdf](http://www.minagri.gob.ar/SAGPyA/agricultura/agua_y_suelos/03-riego/T%201%20Riego%20a%20nivel%20país.pdf) 14 paginas. Consultada en mayo de 2010.

BID-PROSAP 2009. “Una estrategia para el manejo integrado del agua para riego en Argentina”

MARTELLOTTA, M.; SALINAS, A.; LOVERA, E.; SALAS, P.; ALVAREZ, C.; GIUBERGIA, J.; LINGUA, S. 2005. “Inventario y Caracterización del Riego suplementario en la provincia de Córdoba”. Riego presurizado, pivot central. Boletín N° 10.

---

## Capítulo 5

ABO-GHOBAR, H.M., 1992. “Losses from low pressure center-pivot irrigation systems in a desert climate as affected by nozzle height”. *Agric. Water Manage.* 21, 23-32.

ALLEN R. G.; KELLER J.; MARTIN D. (2000). “Center pivot system design”. *The Irrigation association*. ([www.irrigation.org](http://www.irrigation.org))

ANSI/ASABE Standards S436.1 (2001). “Test procedure for determining the uniformity of water distribution of centre pivote, and lateral move irrigation machines equipped with spray or sprinkler nozzles”. In: *ASABE Standards*. ASABE, St. Joseph, M.I., USA.

CHEN J.Y.; TANG C.Y.; SAKURA Y.; KONDOH A.; SHEN Y.J.; SONG X.F. (2004). “Measurement and analysis of the redistribution of soil moisture and solutes in a maize field in the lower reaches of the Yellow River”. *Hydrol. Process.* 18: 2263 – 2273.

DE JUAN J. A.; ORTEGA J. F.; TARJUELO J. M. (2003). “Sistemas de cultivo. Evaluación de itinerarios técnicos”. Consejería de Agricultura y Medio Ambiente de la Junta de Comunidades de Castilla – La Mancha and Ed. Mundi Prensa, Madrid.

DE JUAN J. A.; TARJUELO J. M.; JIMÉNEZ M.; PICORNELL M. R.; ORTEGA J. F. (2008). “La distribución del agua bajo riego por aspersión estacionario y su influencia sobre el rendimiento del cultivo del maíz” (*Zea mays* L.). *Tierras*, nº 146, 92-104

DECHMI F. (2002). “Gestión del agua en sistemas de riego por aspersión en el Valle del Ebro: análisis de la situación actual y simulación de escenarios”. Tesis Doctoral. Universidad de Lleida. España.

DECHMI F.; PLAYAN E.; CAVERO J.; MARTÍNEZ-COB A.; FACI J. M. (2004). “Couple crop and solid set sprinkler simulation model. I: Model de-

- velopment". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE, 130 (6): 499-510.
- EDLING, R., 1985. "Kinetic energy, evaporation and wind drift of droplets from low pressure irrigation nozzles". *Trans. ASAE* 28, 5, 1543-1550.
- FACI J. M.; SALVADOR R.; PLAYÁN E.; SOURELL H. (2001). "Comparison of Fixed and Rotating Spray Plate Sprinklers". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 127 (4): 224-236.
- JIMÉNEZ M. (2008). "La distribución del agua bajo riego por aspersión estacionario y su influencia sobre el rendimiento del cultivo de la cebolla" (*Allium cepa* L.). Tesis Doctoral. ETSIA, Universidad de Castilla-La Mancha. Albacete-España
- JIMÉNEZ M.; TARJUELO J. M.; ORTEGA J. F.; DE JUAN J. A. (2009). "A uniformity study in a permanent sprinkler irrigation system". *Agricultural Water Management*. (In pressen)
- HEERMANN D. (1990). Center pivote design and evaluation. Proc. of the Third Nat. Irrigation Symp. Phoenix, Ariz, St Joseph, MI, USA. ASAE.
- ISO-11545 (2001). Agricultural irrigation equipment. Centre pivote and moving lateral irrigation machines with sprayer or sprinkler nozzles. Determination of uniformity of water distribution.
- KINCAID, D.C., NABIL, M., BUSCH, J.R., 1986. Spray losses und uniformity with low pressure center pivot. American Society of Agricultural Engineers (ASAE). Paper N° 86-2091.
- KINCAID D.; SALOMON K.; OLIPHANT J. (1996). "Drop size distributions for irrigation sprinklers". *Transaction of the ASAE*. Vol. 39(3): 839-845.
- KING B.; KINCAID D. (1998). "Optimizing performance of pivot sprinkler packages". Online Edition (*Agricultural Irrigation*). <http://www.irrigation.org/ibt/9810>
- LI J.; KAWANO H. (1996). "The areal distribution of soil moisture under sprinkler irrigation". *Agricultural Water Management*. 32: 29-36.
- LI J. (1998). "Modelling crop yield as affected by uniformity of sprinkler irrigation system". *Agricultural Water Management*. 38: 135-146.
- LI J.; RAO M. (2000). "Crop yield as affected by uniformity of sprinkler irrigation system". *Proceeding of the XIV memorial CIGR World congress*. 181- 186.
- LOUIS M.; SELKER J. (2000). "Sprinkler head maintenance effects on water application uniformity". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE, 126 (3): 142-148.
- MARTÍNEZ R. (2004). "La distribución del agua bajo riego por aspersión estacionario y su influencia sobre el rendimiento del cultivo de maíz". (*Zea mays* L.). Tesis Doctoral. ETSIA, Universidad de Castilla-La Mancha. Albacete-España.
- MCLEAN R.; SRI RANJAN R.; KLASSEN G. (2001). "Spray evaporation losses from sprinkler irrigation system". *Canadian Agricultural Engineering*. Vol. 42 (1): 1.1-1.15.
- MERRIAN J. L.; KELLER J. (1978). "Farm Irrigation System evaluation: a guide for management". Utah State University, Logan, Utah, USA.
- MERRIAN J.; SHEARER M.; BURT C. (1980). "Evaluating irrigation systems and practices". In. *Design and operation of Farm Irrigation Systems* M.E Jensen ASAE monograph n° 3 pp. 721-760.
- MONTERO J.; DE JUAN J. A.; ORTIZ J.; TARJUELO J. M. (2003). "Efecto de la altura del emisor sobre la distribución de agua en equipos pivote y sobre el rendimiento de los cultivos". XXI Congreso Nacional de Riegos y Drenajes. Mérida. Asociación Española de Riegos y Drenajes, Madrid, España.
- ORTEGA J. F.; DE JUAN J. A.; TARJUELO J. M.; LOPEZ E. (2004) (a). MOPECO: an economic optimization model for irrigation water management. *Irrig. Sci.* 23:61-75
- ORTEGA J. F.; TARJUELO J. M.; DE JUAN J. A.; CARRIÓN P. (2004) (b). "Distribution uniformity and its economics effects in the irrigation management of semi-arid zones". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 130, 257-268.
- PAPADAKIS J. (1966). "Climates of the World and their Agricultural Potentialities". Ed. Hemisferio Sur, Buenos Aires, Argentina.

PEREIRA L. S.; ALLEN R. G. (1999). Crop water requirements. En: H.N. van Lier (ed.), L.S. Pereira and F.R. Steiner (co-eds.), CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Vol. I: Land and Water Engineering, Chapter 5: Irrigation and Drainage, 213 – 262. ASAE, St. Joseph, MI, USA.

Sentek (2000). Diviner 2000 User Guide. Version 1.2. Sentek Pty. Ltd., Stepney, Australia.

SOLOMON K.; KINCAID D.; BEZDEK J. (1996). "Drop size distributions for irrigation spray nozzles". *Trans. ASAE* 28, 6, 1966-1974.

SOURELL H.; FACI J. M.; PLAYÁN E. (2003). "Performance of Rotating Spray Plate Sprinklers in Indoor Experiments". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE, 129 (5): 1-5.

STERN J.; BRESLER E. (1983). "Nonuniform sprinkler irrigation and crop yield". *Irrig. Sci.* 4: 17-29.

TARJUELO J. M.; MONTERO J.; VALIENTE M.; HONRUBIA F.; ORTIZ J. (1999). "Irrigation uniformity with medium size sprinklers". Part I: Characterization of water distribution in no-wind condition. *Transaction of the ASAE*. 42 (3): 665-675.

TARJUELO J. M. (1999). "El riego por aspersión y su tecnología". 2ª Edición. Ediciones Mundi Prensa. Spain.

TARJUELO, J. M., ORTEGA, J.F., MONTERO, J., DE JUAN, J.A., 2000. "Modelling evaporation and drift losses in irrigation with medium size impact sprinklers under semi-arid conditions". *Agric. Water Manage.* 43, 263-284.

USDA (1979). "Soil Conservation Service". *Engineering Field Manual* USDA, SCS.

---

## Capítulo 6

DURÁN P. Y GARCÍA PETILLO M. 2007. Desarrollo de tecnologías apropiadas para riego por surcos en terrazas paralelas y tierras con pendiente. *Ingeniería del Agua*, Vol. 14, Nº 3, 187-198.

GARCÍA PETILLO M. 2010. Análisis crítico del método de riego por goteo en las condiciones del Uruguay. *Revista Agrociencia* Vol. XIV, Nº1, pp. 36-43.

HANSON B., BOWERS W., DAVIDOFF B., KASAPLIGIL D., CARVAJAL A. and BENDIXEN W. 1995. Field performance of microirrigation systems. En: *Microirrigation for a changing world: conserving resources/preserving the environment*. (Proc. 5th. Int. Microirrigation Congress. Orlando, Florida). Ed. Lamm, F. R., ASABE, St. Joseph, MI, USA, pp. 769-774.

HAYASHI R., PUPPO L., MORALES P. y GARCÍA PETILLO M. Descripción y cuantificación de los bulbos mojados en suelos de textura contrastantes, con diferentes patrones de aplicación del agua de riego localizado. *Revista Agrociencia* (trabajo enviado)

KELLER J. and BLIESNER R. D. 1990. *Sprinkle and trickle irrigation*. The Blackburn Press. New York. 652 pp.

PEREIRA L. S. 1999. Higher performances through combined improvements in irrigation methods and scheduling: a discussion. *Agric. Water Manage.* 40: 153-169.

PEREIRA L. S. and TROUT T. J. 1999. Irrigation methods. En: *CIGR Handbook of agricultural engineering*, vol. I: Land and water engineering. Eds. van Lier H. N., PEREIRA L. S. and STEINER F. R., ASABE, St. Joseph, MI, USA, pp. 297-379.

PEREIRA L. S., DE JUAN J. A., PICORNELL M. R. y TARJUELO J. M. 2010. *El riego y sus tecnologías*. CREA-UCLM, España, 296 pp.

TARJUELO J. M. 2005. *El riego por aspersión y su tecnología*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España, 581 pp.

---

## Capítulo 7

ALLEN RG, PEREIRA LS, 2009. "Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height". *Irrigation Science*, 28, 17-34

ALLEN R.G., SMITH M., PERRIER A., PEREIRA L.S., 1994a. "An update for the definition of reference evapotranspiration". *ICID Bulletin*, 43(2): 1-34.

ALLEN, R.G., SMITH, M., PEREIRA, L.S., PERRIER, A. 1994b. "An update for the calculation of reference evapotranspiration". *ICID Bulletin*, 43 (2): 35-92.

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M., 1998. "Crop Evapotranspiration: Guidelines

- for Computing Crop Water Requirements". FAO *Irrigation and Drainage Paper* 56. Rome, 300 pp.
- ALLEN, R.G., PEREIRA L.S., SMITH, M., RAES, D., WRIGHT, J.L., 2005a. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *J. Irrig. Drain. Engng.* 131(1): 2-13.
- ALLEN, R.G., PRUITT, W.O., RAES, D., SMITH, M., PEREIRA L.S., 2005b. Estimating evaporation from bare soil and the crop coefficient for the initial period using common soils information. *J. Irrig. Drain. Engng.* 131(1): 14-23.
- ALLEN R.G., PRUITT W.O., WRIGHT J.L., HOWELL T.A., VENTURA F., SNYDER R., ITENFISU D., STEDUTO P., BERENGENA J., YRISARRY J.B., SMITH M., PEREIRA L.S., RAES D., PERRIER A., ALVES I., WALTER I., ELLIOTT R., 2006a. "A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method". *Agric. Water Manage.* 81:1-22.
- ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D., SMITH M., 2006b. "Evapotranspiración del Cultivo. Guías para la Determinación de los Requerimientos de Agua de los Cultivos". *Estudio Riego y Drenaje* 56, FAO, Roma
- ALLEN R.G., TASUMI M., MORSE A., TREZZA R., WRIGHT J.L., BASTIAANSEN W., KRAMBER W., LORITE I., ROBISON C.W., 2007a. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) — Applications. *J. Irrig. Drain. Engng.* 133: 395–406
- ALLEN R.G., WRIGHT J.L., PRUITT W.O., PEREIRA L.S., JENSEN M.E., 2007. "Water Requirements". In: G.J. Hoffman, R.G. Evans, M.E. Jensen, D.L. Martin, R.L. Elliot (eds.) *Design and Operation of Farm Irrigation Systems* (2nd Edition), ASABE, St. Joseph, MI, pp. 208-288.
- AZEVEDO P.V., SILVA B.B. DA, SILVA V.P.R. da, 2003. "Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil". *Agric. Water Manage.* 58: 241-254.
- BASTIAANSEN W.G.M., HARSHADEEP N.R., 2005. "Managing scarce water resources in Asia: The nature of the problem and can remote sensing help?" *Irrig Drain Syst* 19: 269–284
- CAI JB, LIU Y, LEI TW, PEREIRA LS, 2007. "Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages". *Agric. For. Meteo.* 145: 22–35
- CAI J, LIU Y, XU D, PAREDES P, PEREIRA LS, 2009. "Simulation of the soil water balance of wheat using daily weather forecast messages to estimate the reference evapotranspiration". *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, 1045–1059
- CALERA A., JOCHUM A.M., CUESTA A., MONTORO A., LÓPEZ P., 2005. "Irrigation management from space: Towards user-friendly products". *Irrig Drain Syst* 19: 337–353
- CAMEIRA M.R., FERNANDO R.M., PEREIRA L.S., 2003. "Monitoring water and NO<sub>3</sub>-N in irrigated maize fields in the Sorraia watershed, Portugal". *Agric. Water Manage.* 60: 199-216.
- CAMEIRA M.R., FERNANDO R.M., AHUJA L., PEREIRA L.S., 2005. "Simulating the fate of water in field soil-crop environment". *Journal of Hydrology* 315: 1-24.
- DOORENBOS J. AND PRUITT W.O., 1975. "Guidelines for Predicting Crop Water Requirements". *FAO Irrigation and Drainage Paper* 24, FAO, Rome, 179 p.
- GARATUZA-PAYAN J., WATTS C.J., 2005. "The use of remote sensing for estimating ET of irrigated wheat and cotton in Northwest Mexico". *Irrig Drain Syst* 19: 301–320
- GODINHO P., SEQUEIRA B., PAREDES P., PEREIRA L.S., 2008. "Simulação das necessidades de água das culturas pela metodologia dos coeficientes culturais duais". Modelo SIMDualKc. In: E. Ruz e L.S. Pereira (eds.) *Modernización de Riegos y Uso de Tecnologías de Información* (Red CYTED-Riegos, La Paz, Bolivia, Set. 2007), PROCISUR Y CYTED, Montevideo.
- HOWELL T.A., EVETT R., TOLK J.A., SCHNEIDER A.D., 2004. "Evapotranspiration of full-, deficit-irrigated, and dryland cotton on the Northern Texas High Plains, *J. Irrig. Drain. Engng.*, 130: 277-285
- JENSEN M.E., BURMAN R.D., ALLEN R.G. (Eds.), 1990. "Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements". *Am. Soc. Civ. Eng. Manual* N° 70, ASCE, N. York, 332 pp.

- MATEUS P., PEREIRA L.S., HIPÓLITO J., 2007. "Mapeamento das propriedades hidráulicas e evaporativas do solo aplicando funções de pedo-transferência e de geoestatística". In: *Agroingeniería 2007* (IV Cong. Nac. y I Cong Ibérico, Albacete), SE AgIng y CREA, Albacete, CD-ROM paper B-901.
- MONTEITH J.L., 1965. "Evaporation and the environment". In: *The State and Movement of Water in Living Organisms*. In: XIXth Symposia of the Society for Experimental Biology. University Press, Swansea, Cambridge, pp. 205-234.
- MONTEITH J.L., UNSWORTH M.H., 1990. "Principles of Environmental Physics". 2nd ed., Edward Arnold, London.
- PAÇO T.A., ROSA R.D., PAREDES P., RODRIGUES G.C., CONCEIÇÃO N., FERREIRA M.I., PEREIRA L.S., 2009. "The dual crop coefficient approach: testing the SIMDUALKc model with peach orchard evapotranspiration eddy covariance measurements". In: VI International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops, ISHS, Viña del Mar, Chile (a publicar in *Acta Horticulturae*).
- PEREIRA L. S., 1999. "Higher performances through combined improvements in irrigation methods and scheduling: a discussion". *Agric. Water Manage.* 40 (2): 153-169.
- PEREIRA L.S., 2004. "Necessidades de Água e Métodos de Rega". Publ. Europa-América, Lisboa, 313 p.
- PEREIRA L.S., ALLEN R.G., 1999. Crop water requirements. In: HN van Lier, LS Pereira, FR Steiner (Eds.) *CIGR Handbook of Agricultural Engineering*, Vol. I: Land and Water Engineering, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 213-262.
- PEREIRA L.S., ALVES I., 2005. Crop water requirements. In: D. Hillel (ed.) *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Elsevier, London and New York, vol. 1, pp. 322-334.
- PEREIRA L.S., PERRIER A., AIT KADI M., KABAT P. (eds): 1992. *Crop Water Models*. ICID Bulletin Special issue 41 (2).
- PEREIRA L.S., VAN DEN BROEK B., KABAT P., ALLEN R.G., editors, 1995. *Crop-Water Simulation Models in Practice*. Wageningen Pers, Wageningen.
- PEREIRA L.S., PERRIER A., ALLEN R.G., ALVES I., 1999. "Evapotranspiration: concepts and future trends". *J. Irrig. Drain. Engrg. ASCE* 125 (2), 45-51.
- PEREIRA L.S., OWEIS T., ZAIRI A., 2002. "Irrigation management under water scarcity". *Agric. Water Manage.* 57: 175-206.
- PEREIRA L.S., CAI L.G., HANN M.J., 2003. "Farm water and soil management for improved water use in the North China Plain. *Irrigation and Drainage*" 52 (4): 299-317.
- PEREIRA L.S., TEODORO P.R., RODRIGUES P.N., TEIXEIRA J. L., 2003. Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG. In: G. Rossi, A. Cancelliere, L. S.
- PEREIRA, T. OWEIS, M. SHATANAWI, A. ZAIRI (Eds.) "Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions". Kluwer, Dordrecht, pp. 161-180.
- PEREIRA, LS, DE JUAN, JA, PICORNELL, MA, TARJUELO, JM, 2010. *El Riego y sus Tecnologías*. Centro Regional de Estudios del Agua, Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete (<http://crea.uclm.es/crea2/sp/index.php>)
- POPOVA Z., KERCHEVA M., PEREIRA L.S., 2006. "Validation of the FAO methodology for computing ET<sub>o</sub> with missing climatic data. Application to South Bulgaria". *Irrig & Drain* 55: 201-215.
- TEIXEIRA J.L., PEREIRA L.S., 1992. ISAREG, an irrigation scheduling model. *ICID Bulletin*, 41: 29-48.
- ZHAO NN, LIU Y, CAI JB, ROSA R, PAREDES P, RODRIGUES GC., PEREIRA LS., 2010. "The dual crop coefficient approach: Application of the SimdualKc model to winter wheat in North China Plain". XVIIIth World Congress of CIGR, CSBE/SCGAB, Québec City, Canada

---

## Capítulo 8

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M., 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Irrigation and Drainage Paper No 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome, Italy.

- ANYOJI, H., WU, I.O., 1994. Normal distribution water application for drip irrigation schedules. *Trans ASAE* 37:159-164.
- BOOGAARD, H.L., VAN DIEPEN, C.A., RÖTTER, R.P., CABRERA, J.M.C.A., VAN LAAR, H.H., 1998. User's Guide for the WOFOST 7.1 Crop Growth Simulation Model and WOFOST Control Center 1.5. DLO-Winand Staring Centre, Wageningen, Technical Document 52.
- CERRATO, M.E., BLACKMER, A.M., 1990. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agron. J.* 82, 138-143.
- CHEN JY; TANG CY; SAKURA Y; KONDOH A; SHEN YJ; SONG XF (2004). Measurement and analysis of the redistribution of soil moisture and solutes in a maize field in the lower reaches of the Yellow River. *Hydrol. Process.* 18: 2263 – 2273.
- CHRISTIANSEN, J.P., 1942. Irrigation by sprinkling. University of California. *Agric. Exp. Stn. B-670*, pp. 110-116.
- DE JUAN J.A., TARJUELO J.M., JIMÉNEZ M., PICORNELL M<sup>a</sup>.R., ORTEGA J.F., 2008. La distribución del agua bajo riego por aspersión estacionario y su influencia sobre el rendimiento del cultivo del maíz (*Zea mays* L.). *Tierras de Castilla y León*, nº 146, 92-104
- DE WIT, C.T., 1958. Transpiration and crop yield. *Versl. Landbouk. Onderz.* 64. Wageningen, The Netherlands.
- ERRHEBI, M., ROSEN, C.J., GUPTA, S.C., BIRONG, D.E., 1988. Potato yield response and nitrate leaching as influenced by nitrogen management. *Agron. J.*, 90, 10-15.
- GARCÍA, L.A., FOGED, N., CARDON, G.E., 2006. Development of GIS-BASED model to estimate relative reductions in crop yield due to salinity and waterlogging. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 132(6), 553-563.
- HATFIELD, J.; SAUER, T.; PRUEGER, J. 2001. Managing soils to achieve greater water use efficiency: A Review. *Agron. J.* 93: 271-280.
- HEERMANN, D.F., DUKE, H.R., DAWSON, L.J., 1991. Distribution functions to represent center pivot water distribution. Paper SW91-2051, ASAE.
- HEERMANN, D.F., HEIN, P.R., 1968. Performance characteristics of self-proped center pivot sprinkler irrigation system. *Transactions of the ASAE*, 11 (1): 11-15.
- HOWELL, T. 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agron. J.* 93: 281-289.
- JIMÉNEZ, M., 2008. La distribución del agua bajo riego por aspersión estacionario y su influencia sobre el rendimiento del cultivo de cebolla (*Allium cepa* L.). Doctoral Thesis. Universidad de Castilla – La Mancha, Albacete, Spain.
- JIMÉNEZ M., TARJUELO J.M., ORTEGA J.F., AND DE JUAN J.A. 2009. A uniformity study in a permanent sprinkler irrigation system. *Agricultural Water Management*. (en publicación).
- KELLER, J., BLIESNER, R.D., 1990. Sprinkle and Trickle Irrigation. AVI Book, Van Nostrand Reinhold, New York, USA.
- KROPFF, M.J., SPITTERS. C.J.T., 1993. A simple model of crop loss by weed competition from early observations on relative leaf area of the weeds. *Weed Research* 31, 97-105.
- LETEY, J., VAUX, H.J., FEINERMAN, E., 1984. Optimum crop water application as affected uniformity of water infiltration. *Agronomy Journal* 76, 435-441.
- LI J., KAWANO H. 1996. The areal distribution of soil moisture under sprinkler irrigation. *Agricultural Water Management*. 32:29-36.
- LÓPEZ BELLIDO, L. 1998. “El uso del agua en los sistemas agrícolas mediterráneos”. En: R. M. Jiménez y J. Lamo (Coord.). *Agricultura sostenible*. Ediciones Mundi Prensa. España.
- MANSILLA, J., 2005. “Efectos agronómicos de la duración y período de competencia entre la flora arvense y la remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L. var. *altissima* Döll) de siembra primaveral”. Thesis. Universidad de Castilla – La Mancha, Albacete, Spain.
- MANTOVANI, E.C., VILLALOBOS, F.J., ORGAZ, F., FERERES, E., 1995. “Modeling the effects of sprinkler irrigation uniformity on crop yield”. *Agricultural Water Management* 27, 243-257.
- MARTÍN DE SANTA OLALLA F.J., DE JUAN J.A., 1993. “La programación de riegos”. In: Martín de Santa Olalla F.J., de Juan J.A.

(Coord.) *Agronomía del riego*. Mundi-Prensa y Universidad de Castilla-La Mancha. Madrid, Spain.

MARTÍNEZ, R.S., 2004. "La distribución del agua bajo riego por aspersión estacionario y su influencia sobre el rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.)". Tesis Doctoral. ETSIA, Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete, España.

ORTEGA, J.F.; TARJUELO, J.M.; DE JUAN, J.A.; CARRIÓN, P. (2004a b). Distribution uniformity and its economics effects in the irrigation management of semi-arid zones. *J. Irrig. Drain. Eng.* 130: 257 – 268.

ORTEGA, J.F.; DE JUAN, J.A.; TARJUELO, J.M.; LÓPEZ, E. (2004b a). MOPECO: an economic optimization model for irrigation water management. *Irrig. Sci.* 23: 61 – 75.

ORTIZ J.N., DE JUAN, J.A., TARJUELO J.M. (2009). Analysis of water application uniformity in a centre pivot and its effect on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield, *Biosystems Engineering*. (en publicación)

PASCUAL, B., 1996. "Riegos de gravedad y a presión". Servicio de Publicaciones. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Spain.

PEREIRA, L.S., GONÇALVES, J.M., DONG, B., MAO, Z., FANG, S.X., 2007. "Assessing basin irrigation and scheduling strategies for saving irrigation water and controlling salinity in the upper Yellow river basin, China". *Agric. Water Manage.* 93, 109-122.

SEGINER, I., 1987. "Spatial water distribution in sprinkle irrigation". *Adv. Irrig.* 4, 119-168.

STERN J; BRESLER E (1983). "Nonuniform sprinkler irrigation and crop yield". *Irrig. Sci.* 4: 17-29.

STEWART, J.I., HAGAN, R.M., PRUITT, W.O., KANKS, R.J., RILEY, J.P., DANILSON, R.E., FRANKLIN, W.T., JACKSON, E.B., 1977. "Optimizing crop production through control of water and salinity levels". Utah Water Res. Lab. PWRG 151-1. Utah, USA.

STÖCKLE, C.O., DEBAEKE, P., 1997. Modelling crop nitrogen requirement: a critical analysis. *Eur. J. Agron.*, 7, 161-169.

STÖCKLE, C.O., MARTÍN, S., CAMPBELL, G.S., 1994. CropSyst: a cropping systems model: water/nitrogen budgets and crop yield. *Agric. Syst.* 46, 335-359.

SUDAR, R.D., SAXTON, K.E., SPOONER, R.G., 1981. A predictive modelo f water stress in corn and soybean. *Trans. ASAE* 24, 97-102.

TARJUELO, J.M., 1999. "El riego por aspersión y su tecnología". Mundi-Prensa S.A. Madrid, Spain.

TEIXEIRA, J.L., PEREIRA, L.S., 1992. ISAREG, an irrigation scheduling simulation model. *ICID Bull.* 41 (2), 29-48.

VITTA, J.I., SATORRE, E.H., 1999. "Validation of a Weed-Crop Competition Model". *Weed Research*, 39, 259-269.

WARRICK, A.W., GARDNER, W.R., 1983. Crop yield Proceeding. California. USA. 439-442. as affected by spatial variation of soil and irrigation. *Water Resources Research* 19, 181-186.

WARRICK, A.W., HART, W.E., YITAYEW, M., 1989. "Calculation of distribution and efficiency for nonuniform irrigation". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 109 (3): 317, 322.

---

## Capítulo 9

AHUJA, L.R.; NIELSEN, D.R. 1990. "Field soil-water relations". In: Stewart, B.A. & Nielsen, D.R.; *Irrigation of agricultural crops*. Madison, American Society of Agronomy, p.143-189.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, 300 pp.

ALLEN R.G.; PEREIRA L.S.; RAES D.; SMITH M.; 2006. "Evapotranspiración del Cultivo. Guías para la Determinación de los Requerimientos de Agua de los Cultivos". *Estudio Riego y Drenaje* 56, FAO, Roma

ALLEN R.G.; WRIGHT J.L.; PRUITT W.O.; PEREIRA L.S.; JENSEN M.E.; 2007. Water Requirements. In: G.J. Hoffman, R.G. Evans, M.E. Jensen, D.L. Martin, R.L. Elliot (eds.) *Design and Operation of Farm Irrigation Systems* (2nd Edition), ASABE, St. Joseph, MI, pp. 208-288.

- CAMEIRA, M.R.; FERNANDO, R.M., AHUJA, L.; PEREIRA, L.S.; 2005. "Simulating the fate of water in field soil-crop environment". *Journal of Hydrology* 315: 1-24.
- CARLESSO, R.; ZIMMERMANN, F.L. 2000. "Água no solo: parâmetros para dimensionamento de sistemas de irrigação". Santa Maria, Imprensa Universitária, 65p.
- CHATERLAN, Y.; DUARTE, C.; LEÓN, M.; PEREIRA, L.S.; TEODORO, P.R.; GARCIA, R.R., 2007. Coeficientes de cultivo de la cebolla y su determinación con el modelo ISAREG. In: E. Ruz e L.S. Pereira (eds.) *Modernización de Riegos y Uso de Tecnologías de Información (Red CYTED-Riegos, La Paz, Bolivia), PROCISUR y CYTED, Montevideo* (<http://ceer.isa.utl.pt/cyted/2007/bolivia2007/Tema%201/1.4 Yoima LaPaz Set2007.pdf>)
- DOORENBOS, J., PRUIT, W. O., 1975. Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, Rome 179p.
- EL AMAMI, H., ZAIRI, A., PEREIRA, L.S., MACHADO, T., SLATNI, A., RODRIGUES ,P.N. 2001. Deficit irrigation of cereals and horticultural crops. 2. Economic analysis. *Agr. Engng. Intern.* (<http://cigr-ejournal.tamu.edu/volume3.html>) Vol. III, Manuscript LW 00 007b.
- GARCIA, M. 2008. Manejo del riego: uso de instrumentos de medición de agua del suelo y del estado hídrico de los cultivos, presentación de casos de estudio incluso en riego deficitario (estas Jornadas).
- GODINHO, P.; SEQUEIRA, B.; PAREDES, P.; PEREIRA, L.S., 2008. Simulação das necessidades de água das culturas pela metodologia dos coeficientes culturais duais. Modelo SIMDUALKc. In: E. Ruz e L.S. Pereira (eds.) *Modernización de Riegos y Uso de Tecnologías de Información (Red CYTED-Riegos, La Paz, Bolivia, Set. 2007), PROCISUR y CYTED, Montevideo* (disponible en <http://ceer.isa.utl.pt/cyted/2007/bolivia2007/Tema%201/1.6 PParedes LaPaz Set07.pdf>).
- HARGREAVES, G.H., 2000. Food, Water, and Possible World Crisis. In: *Proceedings of the 4th Decennial Symposium - National Irrigation Symposium*, Phoenix, Arizona: 187-194.
- HILLEL, D.1980. *Applications of soil Physics*. Academic Press, New York.
- HOWELL, T.A. 2000. Irrigation role in enhancing water use efficiency. In: *National Irrigation Symposium*. American Society of Agricultural Engineers, Phoenix, Arizona, p.66-80.
- JONG VAN LIER, Q. 2000. "Índices de disponibilidade de água para as plantas". In: Freitas, J.R. *Tópicos em Ciência do Solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.95-106.
- LIU, Y.; LI Y.N.; PEREIRA, L.S.; FERNANDO, R.M.; TEIXEIRA, J.L. 2000. Irrigation management strategies for water saving in North China plain In: *The XIV Memorial CIGR World Congress (Tsukuba, Japan, Nov/Dec 2000) CIGR, CD-Rom paper R 1105*.
- PAZ, V.P.S.; TEODORO, R.E.F.; MENDONÇA, F.C. 2000. "Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente". *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.4, n.3, p.465-473.
- PENMAN, H.L.; ANGUS, D.E.; VAN BAVEL, C.H.N.; 1967. "Microclimatic facts affecting evaporation and transpiration". In Hagan R.N. Haise H.H. & Edminster, T.W. *Irrigation of Agricultural Lands*. Amer. Soc. Agronomy p. 483-505
- PEREIRA, A.R.; VILA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C.; 1997. "Evapo(transpi)ração". Piracicaba: FEALQ, 183 p.
- PEREIRA L.S., 2004. "Necessidades de Água e Métodos de Rega". Publ. Europa-América, Lisboa, 313 p.
- PEREIRA L.S., 2008. Necessidades de água das culturas: evapotranspiração de referência, coeficientes de cultivo e balanço hídrico (estas Jornadas).
- PEREIRA, L.S.; ALLEN R.G., 1997. "Novas aproximações aos coeficientes culturais". *Engenharia Agrícola*, 16(4): 118-143.
- PEREIRA L.S.; ALLEN R.G., 1999. Crop water requirements. In: HN van Lier, LS Pereira, FR Steiner (Eds.) *CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Vol. I: Land and Water Engineering*, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 213-262.
- PEREIRA L.S.; PERRIER, A.;AIT KADI, M., KABAT, P. (eds): 1992. *Crop Water Models*. ICID Bulletin Special issue 41 (2).

PEREIRA, L.S.; VAN DEN BROEK B.; KABAT, P.; ALLEN R.G., editors, 1995. *Crop-Water Simulation Models in Practice*. Wageningen Pers, Wageningen.

PEREIRA L.S.; TEODORO P.R.; RODRIGUES P.N.; TEIXEIRA J. L., 2003. "Irrigation scheduling simulation: the model" ISAREG. In: G. Rossi, A. Cancelliere, L. S. Pereira, T. Oweis, M. Shatanawi, A. Zairi (Eds.) *Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions*. Kluwer, Dordrecht, pp. 161-180.

PEREIRA, L.S.; ALLEN, R.G.; PERRIER A., 2006. "Méthode Pratique de Calcul des Besoins en Eau". In: JR Tiercelin e A Vidal (Eds.) *Traité d'Irrigation*, 2ème edition, Lavoisier, Technique & Documentation, Paris, pp. 227-268.

PETRY, 2000. "Interação solo-planta e disponibilidade de água no solo às plantas de sorgo e soja". Santa Maria, RS. 125 p. (Mestrado em Agronomia) Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal de Santa Maria

RODRIGUES G., PEREIRA L.S., 2008. "Avaliação dos impactos económicos da rega deficitária no perímetro de rega da Vigia". *Ecosistemas* 17 (1): 86-106.

RODRIGUES, P.N.; PEREIRA, L.S.; ZAIRI, A.; EL AMAMI, H.; TEIXEIRA J.L.; SLATNI A.; MACHADO, T., 2001. Deficit irrigation of cereals and horticultural crops. 1 Simulation of strategies to cope with droughts. *Agr. Engng. Intern.* (<http://cigr-ejournal.tamu.edu/volume3.html>) Vol. III, Manuscript LW 00 007a.

SALOMÓN M.A., SÁNCHEZ C.M., PEREIRA L.S., 2007. Estimación del balance hídrico mediante aplicación del modelo ISAREG en el Canal Segundo Vistalba, Lujan de Cuyo, Mendoza (Argentina). In: E. Ruz e L.S. Pereira (eds.) *Modernización de Riegos y Uso de Tecnologías de Información* (Red CYTED-Riegos, La Paz, Bolivia, Set. 2007), PROCISUR y CYTED, Montevideo (disponible en [http://ceer.isa.utl.pt/cyted/2007/bolivia2007/Tema%201/1.10\\_MSalomon\\_LaPaz\\_Set2007.pdf](http://ceer.isa.utl.pt/cyted/2007/bolivia2007/Tema%201/1.10_MSalomon_LaPaz_Set2007.pdf))

SANTOS, R.F., CARLESSO, R., 1999. "Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas". *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.2, n.3, p.287-294.

VILLA NOVA, N.A.; REICHARDT, K. 1989. "Evaporação/evapotranspiração de um ecossistema e suas relações com o meio ambiente".

Engenharia hidrológica, Rio de Janeiro. Coleção ABRH de recurso hídrico v2 p 145-197.

WALLACE, J.S., BATCHELOR, C.H., 1997. "Managing water resources for crop production". *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, v.352, p.937-947.

---

## Capítulo 10

Asociación de Cultivadores de Arroz, Facultad de Agronomía de la UdelaR, Gremial de Molinos Arroceros, Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Laboratorio Tecnológico del Uruguay. 2009. "Guía de buenas prácticas en el cultivo de arroz en Uruguay". Disponible en: <<http://www.mgap.gub.uy>> Consultado el 10-02-2010.

Aquastat, FAO. 2000. "Uruguay Country Profile". Food and Agriculture Organization. Disponible en: <<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries/uruguay/indexesp.stm>. > Consultado el 16-09-2009.

BLANCO, F. 1989. "Rotaciones. Riego. Resultados Experimentales". CIAAB. Estación Experimental del Este. Serie Resultados Experimentales N° 27. pp. 38-48.

BÖCKING, B; BANDEIRA, S.; CARNELLI, J.P.; GARCÍA, G; MARELLA, M.; MARCO, M.; MOOR, J.C.; HENDERSON, J.P.; GUSONNI, A.; LAVECCHIA, A. 2008. "Manejo del cultivo. Riego intermitente una alternativa que debemos ir incorporando en nuestros sistemas de riego". Resumen de tres años de trabajos sobre el tema. Presentación resultados experimentales de arroz, zafra 2007-2008. INIA Tacuarembó. *Actividades de Difusión* N° 543. Cap. 3. pp. 77-96.

BOUMAN, B.A.M.; TUONG, T.P. (2001) "Field water management to save water and increase its productivity in irrigated rice". *Agricultural Water Management* 49(1), 11-30.

CANTOU, G.; ROEL, A.; MOLINA, F; FARIÑA, S.; PLATERO, S. 2008. Riego. "Efecto del momento de retiro del agua y cosecha en INIA Olimar. Arroz, Resultados experimentales 2007-2008". INIA Treinta y Tres. *Actividades de Difusión* N° 545. Cap. 2. pp. 12-23.

CANTOU, G.; ROEL, A.; CASTIGLIONI, J.I., UGARTE, J.M. 2009. "Arroz, resultados experimentales 2008-2009". Riego. Efecto del momento de la inundación en INIA Olimar y El Paso

144. INIA Treinta y Tres. *Actividades de Difusión* N° 571. Cap. 2. pp. 1-14.

CANTOU, G.; ROEL, A.; CARLOMAGNO, M.; GONZALEZ-SAPIENZA, G. 2009. "Arroz, resultados experimentales 2008-2009"; Valorización del sistema de producción arrocerero. Disipación de los herbicidas clomazone y quinclorac en el arroz bajo dos tratamientos de riego. INIA Treinta y Tres. *Actividades de Difusión* N° 571. Cap. 6. pp. 1-6.

CHAPAGAIN, A.K.; ORR, S. 2008. "An improved water footprint methodology linking global consumption to local water resources: A case of Spanish tomatoes." *Journal of Environmental Management* 90 (2009). pp. 1219-1228.

DIEA, Estadísticas Agropecuarias. Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. 2009. Recopilación de las Estadísticas Básicas del Sector Arrocerero - Período 1998-2009. Disponible en: <<http://www.mgap.gub.uy>> Consultado el 01-04-2010.

FEPAM, Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler. "Licenciamento Ambiental". Actividades agropecuarias. Disponible en: <<http://www.fepam.rs.gov.br>> Consultado el 17-08-2009.

LAVECCHIA, A. 2009. "Manejo del cultivo. Riego. Ensayo de riego continuo vs riego intermitente". Presentación resultados experimentales de arroz, zafra 2008-2009. INIA Tacuarembó. *Actividades de Difusión* N° 585. Cap. 3. pp. 1-14.

MOLINA, F.; ROEL, A.; MUTTERS, R. 2007. "Riego. Efecto del momento de retiro del agua y cosecha en INIA Olimar." Arroz, Resultados experimentales 2006-2007. INIA Treinta y Tres. *Actividades de Difusión* N° 502. Cap. 2. Pp. 11-21.

MOLINA, F.; CANTOU, G.; ROEL, A. Biblioteca virtual de INIA. Disponible en: <<http://www.inia.org.uy/estaciones/ttres/actividades/Resumen%202008%202009.pdf>> Acceso en: julio, 2009.

MVOTMA, Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. 2002. "Informe de la República Oriental del Uruguay a la Cumbre Mundial sobre desarrollo sostenible". Disponible en: < [http://www.mvotma.gub.uy/dinama/index.php?option=com\\_docman](http://www.mvotma.gub.uy/dinama/index.php?option=com_docman)> Consultado el 07-06-2010.

ROEL, A.; BLANCO, F. 1997. "Riego. Consumo de agua en diferentes manejos del riego". Arroz, Resultados experimentales 1996-1997. INIA

Treinta y Tres. *Actividades de Difusión* N° 135. Cap. 12. pp. 17-20.

ROEL, A. 1998. "Riego. Consumo de agua en diferentes manejos del riego". Arroz, Resultados experimentales 1997-1998. INIA Treinta y Tres. *Actividades de Difusión* N° 166. Cap. 12. pp. 15-19.

ROEL, A. 1999a. Riego en INIA Olimar. "Manejo eficiente de la inundación". Arroz, Resultados experimentales 1998-1999. INIA Treinta y Tres. *Actividades de Difusión* N° 194. Cap. 5. pp. 1-11.

ROEL, A. 1999b. "Riego en arroz: manejo eficiente de la inundación". INIA Treinta y Tres. *Boletín de Divulgación* N° 61. 16 p.

SEGOVIA, M. 2007. Efecto del momento de retiro del agua y de cosecha en la variedad INIA Olimar. Tesis de Grado. Facultad de Agronomía. 99 p.

TABBAL, D.F.; Bhuiyan, S.I.; Sibayan, E.B. 2002. Dry-seeding technique for saving water in irrigated rice production systems. In: Direct Seeding in Asian Rice Systems: Strategic Research Issues and Opportunities. Proceedings of an International Workshop, on Direct Seeding in Asia, Bangkok, Thailand, 25-28 January 2000. IRRI, Makati City, Philippines, pp. 281-297.

---

## Capítulo 11

AFP. 2010. Brasil, Argentina, Uruguay y Bolivia trabajan en acuerdos energéticos.

ALONSO-PIPPA, W.; LUENGO, C.A.; FONSECA, FELFLI F.; GARZONE, P.; CORNACCHIA, G. 2009. "Energy recovery from sugarcane biomass residues: Challenges and opportunities of bio-oil production in the light of second generation bio-fuels". *J. Renewable Sustainable Energy* 1, 063102.

HOPKINSON, JR.; DAY, JR. J.W. 1980. Net energy analysis of alcohol production from sugarcane, disponible en [http:// sciencemag.org/cgi/abstract/207](http://sciencemag.org/cgi/abstract/207). Leopold Center Progress Report V.4. 1995. Biomass production and ethanol potential from sweet sorghum.

SAGARDOY ALONSO, J.A. 2003. Gestión del agua para la agricultura. Ingeniería Sin Fronteras, 3° Conferencia sobre Tecnología para el Desarrollo Humano, Desarrollo Agropecuario.

STOUT, B.A. 1984. "Energy use and Management in Agriculture", 318 p.

---

## Capítulo 12

ALLEN R.; PEREIRA L.S.; RAES D.; SMITH M. FAO 56. Estudios de Riego y Drenaje. Evapotranspiración de los cultivos. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. 298p., 1998.

GEERTS, S., RAES, D. 2009. Review. "Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas". *Agricultural Water Management*, 96 (9), 1275-1284.

DENMEAD, O.T. and R.H. SHAW. "The effects soil moisture at different stages of growth on the development and yield of corn". *Agron. J.*, 52: 272-274, 1960.

DENMEAD, O. T. & SHAW, R.H. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. *Agronomy J.* 54:385-90, 1962. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). <http://www.inia.org.uy/gras>, consultado en febrero de 2010.

---

## Capítulo 13

ARANA, S.; PIÑEIRO, G.; GARCÍA, J.; SANTIÑAQUE, F. 2000. "Riego y manejo en la productividad de pasturas con trébol blanco". INIA *Serie Actividades de Difusión* N°. 241, pp. 5-12.

BERRETA, E.J.; BEMHAJA, M. 1998. Producción estacional de comunidades naturales sobre suelos de Basalto de la Unidad Queguay Chico. In: Seminario de Actualización de Tecnologías para Basalto, INIA Serie Técnica 102, pp.11-20.

CLIFFORD, P.T.P. 1979. Effect of closing date on potential seed yields from "Grasslands Huia" and "Grasslands Pitau" white clovers. *N.Z.J. Exp. Agric.* 7:303-306.

CLIFFORD, P.T.P. 1986. Effect of closing date and irrigation on seed yield (and some yield components) of "Grassland Kopu" white clover. *N.Z.J. Exp. Agric.* 14:271-277.

DAMBORIARENA, J. I. ; STINGER, E. A. 2008. Crecimiento de Alfalfa según profundidad de suelo. Tesis Facultad de Agronomía. Montevideo. Uruguay.

DÍAZ LAGO, J.E.; GARCÍA, J.A.; REBUFFO, M. 1996. "Crecimiento de leguminosas en La Estanzuela". INIA *Serie Técnica* 71.

FORMOSO, F.; SAWCHIK, J. 2000. "Producción de semillas de leguminosas forrajeras con riego". INIA *Serie Actividades de Difusión* N°. 227, pp.27-46.

GARCÍA, J.; BARÚ, N.; VERNAZZA, R. 2000. "Riego y producción de semillas de trébol blanco". INIA *Serie Actividades de Difusión* N°. 241, pp. 13-18.

GARCÍA-DÍAZ, C.A.; STEINER, J.J. 1999. Birdsfoot trefoil seed production: I. Crop-water requirements and response to irrigation. *Crop Sci.* 39:775-783.

HOFSTADTER, R. 1983. "Producción de maíz, alfalfa y trébol blanco en condiciones de riego". *Agua en la Agricultura.* 1:7-13.

HOFSTADTER, R.; GONNET, N. 1979. Estudios preliminares sobre el comportamiento del trébol rojo bajo riego. *Rev. Asoc. Ing. Agr.*, 2ª Época, No 12.

MAS, C. 2004. "Algunos resultados de riego de pasturas en el Este". INIA *Serie de Actividades de Difusión* 364, pp.31-46.

OLIVA, R.N.; STEINER, J.J.; YOUNG, W.C. 1994c. White clover seed production: I. Crop water requirements and irrigation time. *Crop Sci.* 34:762-767.

PÉREZ GOMAR, E. 2004. "Respuesta al agua en un mejoramiento forrajero en suelos profundos de Basalto bajo diferentes condiciones de pastoreo". INIA *Serie de Actividades de Difusión* 364, pp. 23-30

PÉREZ GOMAR, E.; MENÉNDEZ, P.; BLANCO, E.; SILVEIRA, M. 2008. Riego en suelos de Basalto. Alternativas tecnológicas para la producción estival en la región de Basalto. *Día de Campo Unidad Glencoe*, pp. 21-23.

PÉREZ GOMAR, E.; SILVEIRA, M.; DE MATTOS, C.; BALPARDA, C. 2010. Setaria, una alternativa forrajera perenne estival para sistemas ganaderos en suelos de Basalto. Después de la lluvia, desafíos de producción animal y forraje para los próximos meses. *Día de Campo Unidad Glencoe*, pp. 39-41.

PRAVIA, V. 2009. "Alternativas forrajeras estivales. Utilización de Setaria sphacelata cv Narok bajo riego con diferentes dotaciones de novillos". En: Jornada de divulgación de producción animal-pasturas. INIA Treinta y Tres. *Serie de actividades de difusión* 591, pp. 13-20.

SANTIÑAQUE, F.H., Y DE BATTISTA, J.P. 2003. Niveles de agua y frecuencias de defoliación en el comportamiento de *Lotus corniculatus* L. *Agrociencia* Vol. VII No. 1. pp. 41-51.

SAWCHIK, J.; FORMOSO, F. 2000. "Inserción del riego en rotaciones de cultivos y pasturas". INIA *Serie de Actividades de Difusión* N°. 227, pp.13-25.

STEINER, J.J.; HUTMACHER, R.B.; GAMBLE, S.D.; AYARS, J.E.; VAIL, S.S. 1992. Alfalfa seed water management. I. Crop reproductive development and seed yield. *Crop Sci.* 32:476-481.

---

## Capítulo 14

ARTAGAVEYTIA, J.Y GIUDICE, G. 2003. Costo de las empresas y Criterios para la Planificación. Banco Central. Montevideo

CHILIBROSTE, P; IBARRA, D; ZIBIL, S; LABORDE, D. 2003. Proyecto Alimentación- Reproducción Conaprole 2002: Informe final. 28 p.

CHILIBROSTE, P. 2004. Producción de forraje en sistemas intensivos de producción animal: desafíos y oportunidades. In: 11a Jornada Nacional de Siembra Directa. Cultivos de verano y Pasturas. Asociación Uruguaya de Siembra Directa. 8 de noviembre, Mercedes.

DURÁN, H.(AÑO) Sistema 1: "Alta producción de leche por hectárea". I. Resultados productivos de los ejercicios 1992-93-94. In: Jornadas de Producción Animal: Lechería y Pasturas. *Serie Actividades de Difusión* Nro 100. INIA. Pp. 1-15.

ERNST, 2004. Uso del suelo en los tambos relevados. En: Proyecto "Interacción Alimentación - Reproducción". Informe final 2003. Acuerdo de trabajo EEMAC - CONAPROLE. 52 pp.

HERNÁNDEZ, A. 2008. Estadísticas del sector lácteo. MGAP-DIEA. Estadísticas Agropecuarias. Serie Trabajos Especiales N°. 266. Octubre, 2008. 37p.

MATTIAUDA, D.; P. CHILIBROSTE, O. BENTANCUR Y P. SOCA. 2009. Intensidad de pastoreo y utilización de pasturas perennes en sistemas de producción de leche: ¿qué niveles de producción permite y qué problemas contribuye a solucionar? xxxvii Jornadas Uruguayas de Buiatría. Paysandú, Uruguay. pp 96-110.

ZANONIANI, R., ZIBIL, S., ERNST, O Y CHILIBROSTE, P. 2004. Manejo del pastoreo y producción de forraje: resultados del monitoreo realizado durante el año 2003. En: Proyecto "Interacción Alimentación - Reproducción". Informe final 2003. Acuerdo de trabajo EEMAC - CONAPROLE. pp 25-33.

---

## Capítulo 15

BAETHGEN, W.; GIMÉNEZ, A. (2004): "La variabilidad climática, el cambio del clima y el sector agropecuario". En: *Clima y respuesta hídrica de pasturas en zonas ganaderas*. INIA. Montevideo, Uruguay.

CARDELLINO, G.; BAETHGEN, W. (2000). "Análisis de la viabilidad de sistemas de riego para maíz: estudio de casos y evaluación de estrategias". INIA La Estanzuela. Montevideo, Uruguay.

FAO (2004). "[Descubrir el potencial del agua para la agricultura](http://www.fao.org/docrep/006/y4525s/y4525s00.htm)" FAO, departamento de agricultura. Roma, Italia. [Http://www.fao.org/docrep/006/y4525s/y4525s00.htm](http://www.fao.org/docrep/006/y4525s/y4525s00.htm).

FAVA, M.; FRACALANZA, P.; NUNES, A. (2007). "Impacts of a liberalization in the USA market for frozen concentrated orange juice: why Florida's producers are so afraid?". *Rer.* Vol. 45, N° 04. Río de Janeiro, Brasil.

GIMÉNEZ, L.; MOSCO, M. (1996). "Riego en maíz: una alternativa a evaluar". *Revista Cangué* N° 8. EEMAC, Universidad de la República. Paysandú, Uruguay.

HEADY, E.O. (1952). "Economics of agricultural production and resource use". Ed. Prentice hall, Englewood cliffs.

PASCALE, R. (1999). "Decisiones financieras". 3ª edición. Buenos Aires, Argentina.

PIEDRABUENA, L.; PIVEL, J.; SCARSI, C. (2008). "El riego agrario en Uruguay: una aproximación económica a su desarrollo (1985 - 2005)". Monografía. Facultad de Ciencias Económicas y Administración, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay.

RITSON, C. (1977). "Agricultural economics: principles and policy". Ed. Westview Press, Boulder. Colorado, Estados Unidos.

Esta publicación  
se termino de imprimir en  
Imprenta Boscana S.R.L.  
en agosto de 2010.

Dep. Legal: 352.968



Auspician:



Colaboran:

