

## EL AGUA EN LOS SISTEMAS EXTENSIVOS

### II. Consumo y eficiencia de uso del agua de los cultivos

Federico Guillermo Micucci<sup>1y2</sup>, Miguel Angel Taboada<sup>2</sup>, Rodolfo Gil<sup>3</sup>.  
 INPOFOS Cono Sur<sup>1</sup>, Cátedra de Fertilidad de Suelos, FAUBA<sup>2</sup>, INTA Castelar<sup>3</sup>  
 fmicucci@ppi-ppic.org

#### Introducción

Los cultivos difieren en su capacidad para extraer agua, de acuerdo con su metabolismo (C4 o C3), la arquitectura de sus hojas (erectófilas o planófilas), el momento del ciclo de crecimiento considerado y otros componentes, resultando en eficiencias de uso de agua muy distintas (Andrade y Gardiol, 1994). Como resultado, existe una fuerte vinculación entre la transpiración y el crecimiento con una gran cantidad de mecanismos distintos para mantener un nivel interno de agua dentro de los límites tolerables. El objetivo de este trabajo es dar a conocer cuales son los factores que afectan al consumo de agua de los principales cultivos extensivos y como estimarlos para poder, en cierta manera, estimar con mayor precisión los rendimientos esperados de cada cultivo.

#### El Sistema Suelo – Planta - Atmósfera

El movimiento del agua a través del continuum suelo – planta – atmósfera puede ser pensado como un gradiente de potenciales agua decrecientes. Estos gradientes constituyen la fuerza propulsora para mantener el flujo de agua dentro del sistema. En la Figura 1 se puede apreciar que el flujo de agua a través de cada parte del sistema es determinado por el gradiente de potenciales y la resistencia en dicho segmento (Gardner, 1960). El movimiento vertical de agua hacia la atmósfera puede darse, o bien a través del suelo y desde allí directamente hacia la atmósfera (evaporación *E*), o también a través del xilema de las raíces, los tallos, y las hojas hacia los poros estomáticos y desde allí hacia la atmósfera (transpiración *T*). Ambas (*E+T*), conforman la evapotranspiración de los cultivos (*ET*), la cual tomará distintos nombres si se refiere al cultivo de referencia (*ET<sub>o</sub>*), o a la evapotranspiración máxima o potencial de un cultivo (*ETM*). Finalmente, la evapotranspiración real es medida directamente en el campo (*ETR*). Las tasas de absorción de agua por los sistemas radicales son usualmente lentas, por ello, las altas tasas de movimiento de agua debido a gradientes de contenido hídrico sólo tienen lugar sobre distancias cortas en torno a las raíces (Figura 1).

#### Factores Determinantes del Rendimiento de los Cultivos en Condiciones Limitantes de Agua

Existen cuatro aspectos principales del comportamiento de las plantas en relación con la sequía: (i) la

modulación del área foliar, (ii) el crecimiento radical, (iii) la eficiencia con la cual las hojas intercambian H<sub>2</sub>O por CO<sub>2</sub>, y (iv) los procesos involucrados en la generación y el llenado de granos Gardner (1983). Los componentes del rendimiento en condiciones limitantes de agua se definen según Passioura (1977) por la ecuación [1]:

$$\text{Rendimiento} = \text{ETM} \times \text{EUA} \times \text{IC} \quad [1]$$

donde ETM es la cantidad máxima de agua evapotranspirada, EUA es la eficiencia en el uso del agua o sea la cantidad de materia seca producida por unidad de agua transpirada, e IC el índice de cosecha es la relación entre el rendimiento en grano y la materia seca total. La Figura 2, muestra la relación del rendimiento en estos tres componentes. Ellos son ampliamente independientes uno del otro, al menos en una primera aproximación, por lo que un incremento en cualquiera de ellos es probable que resulte en un incremento directo del rendimiento.

En general, los cultivos estivales están expuestos a sequías erráticas, de intensidad y duración variables que se originan por una combinación de factores atmosféricos (e.j.: lluvias, altas temperaturas) o edáficos (e.j.: tosca o pan de arcilla cercanos a la superficie). Dependiendo de la intensidad, duración y el momento de ocurrencia, las sequías pueden tener efectos variables desde positivos hasta devastadores (Andrade y Sadras, 2000). Las mayores disminuciones en rendimiento se producen cuando los déficits hídricos ocurren alrededor de floración del maíz o girasol. El maíz es altamente susceptible a las deficiencias de agua en floración, reduciendo el cuaje de granos severamente. En contraposición, el rendimiento del cultivo de

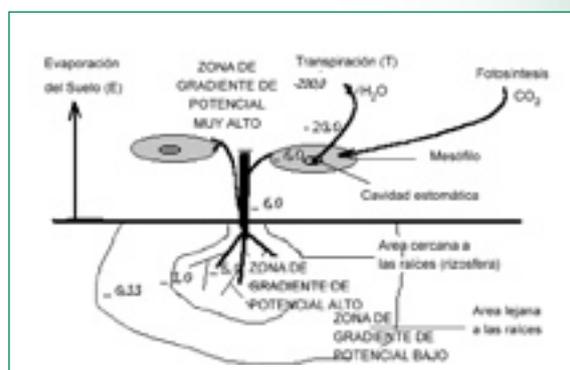


Figura 1. Esquema de los principales componentes del sistema suelo-planta-atmósfera. Los números en negativo indican el potencial agua en bares (adaptado de Gardner, 1960).

soja es más afectado por sequías tardías, o en etapas reproductivas avanzadas, debido a su hábito de crecimiento indeterminado que provoca un alargamiento del periodo de producción de flores comparado con el maíz (Tabla 1).

## Consumo de Agua por los Cultivos

### I. Cálculo del consumo de agua potencial

El consumo de agua de los cultivos resulta del valor de evapotranspiración potencial o máxima acumulada (ETM) a lo largo de su ciclo de crecimiento y desarrollo. Para el estudio de la ETM, es necesario definir un consumo de referencia o evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>). Estos valores se refieren al consumo máximo o potencial de un cultivo denso, bajo y en óptimas condiciones hídricas y van a depender principalmente de la demanda atmosférica. Esta demanda depende de la radiación incidente, de la temperatura, de la humedad relativa del aire y del viento. Al aumentarla, las plantas evapotranspiran mayor cantidad de agua, hasta cierto límite fijado por el potencial agua de sus hojas (Andriani, 1997). Denmead y Shaw (1962) midieron las tasas de transpiración de plantas de maíz sujetas a diferentes condiciones de riego y demanda atmosférica de agua. El valor de succión de agua al cual se apartan las tasas de transpiración potencial y real fue dependiente de la demanda atmosférica. Cuando la tasa de evaporación potencial estuvo por debajo de 2 mm día<sup>-1</sup>, la tasa real cayó por debajo de la tasa potencial a una succión de agua promedio de alrededor de 0,2 MPa. A medida que la tasa potencial aumentó, la succión a la cual el suelo

era capaz de sostener esta tasa disminuyó.

La ET<sub>o</sub> se calcula a través de fórmulas, como la fórmula de Penman (1948), o la de Blaney y Criddle, cuyos datos se pueden obtener de cualquier estación meteorológica. Una vez que conocemos la ET<sub>o</sub>, es posible calcular la ETM mediante la ecuación [2] según Doorenbos y Pruitt (1977),

$$ETM = ET_o \times K_c \quad [2]$$

en donde para cada cultivo y estado de desarrollo existe un factor de corrección K<sub>c</sub> de la ET<sub>o</sub>. Estos valores de K<sub>c</sub> (ETM/ET<sub>o</sub>) varían ampliamente entre cultivos, debido a diferencias en altura, rugosidad, grado de cobertura y de exploración del suelo y resistencia del canopeo a la transpiración, variando también en un cultivo dado a través de la estación de crecimiento (Hillel, 1990). Sencillamente, para un cultivo anual el K<sub>c</sub> es mínimo en emergencia y es máximo cuando logra la máxima cobertura, luego el K<sub>c</sub> decrece a medida que el cultivo madura. Al inicio, la evapotranspiración (ET) es gobernada principalmente por la evaporación del suelo, y los valores del K<sub>c</sub> dependen de las lluvias o riego y también de la ET<sub>o</sub>. Durante el máximo desarrollo del cultivo, los valores dependen de las características propias del cultivo. En este sentido, tanto el manejo de la densidad de plantas, la disminución del espaciamiento entre hileras y el atraso de la fecha de siembra reducen el tiempo necesario en alcanzar el máximo K<sub>c</sub> (Della Maggiora et al., 2000). En la Tabla 2 se comparan los K<sub>c</sub> de maíz, girasol y soja obtenidos en diferentes períodos ontogénicos. De los tres cultivos, el girasol



Figura 2. Relación esquemática entre la precipitación y el rendimiento en grano (adaptado de Ludlow y Muchow, 1990).

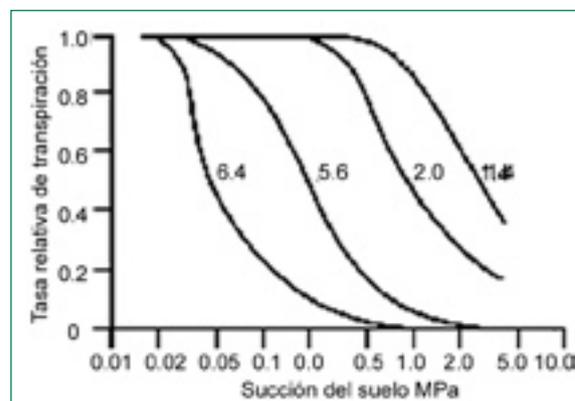


Figura 3. Tasa de transpiración relativa de maíz en función de la succión del suelo, para diferentes tasas de transpiración potencial (mm día<sup>-1</sup>, mostrado con números) en un suelo franco arcillo limoso de Iowa (adaptado Denmead y Shaw, 1962).

Tabla 1. Resumen comparativo del comportamiento del maíz, girasol y soja frente a la sequía (Andrade y Sadras, 2000).

Proceso	MAÍZ	GIRASOL	SOJA
Susceptibilidad a la sequía	máxima	mínima	intermedia
Absorción de agua	media	alta	media/baja
Escape por plasticidad de la floración	baja	baja	alta
Sensibilidad estomática	alta	baja	media
Etapas de susceptibilidad	floración	floración y llenado	fin de floración y llenado

tuvo el Kc máximo más elevado (1,32), contrariamente el cultivo de soja tuvo el Kc máximo más bajo, pero que lo mantuvo por más tiempo. El Kc medio de la estación de crecimiento indicaría para girasol que su ETM acumulada o consumo potencial fue un 4% mayor a la Eto o consumo de referencia.

## 2. Consumo de agua de los principales cultivos extensivos

En la EEA-Pergamino, Totis de Zeljkovich et al. (1991) midieron el consumo real de agua (ETR) en el doble cultivo trigo-soja durante varias campañas agrícolas. En promedio, la ETR en trigo fue superior a las precipitaciones durante el ciclo (339 mm y 292 mm, respectivamente). Contrariamente, para soja la ETR fue menor que las lluvias ocurridas en ese periodo (483 mm y 583 mm). Finalmente, el total de la rotación consumió en promedio de las 4 campañas 822 mm de agua. En la localidad de Santa Isabel, Santa Fe, Andriani (2000) midió el consumo de agua en diferentes cultivos a lo largo de su ciclo de crecimiento y desarrollo (Figura 4). El consumo de agua de maíz y soja de primera son parecidos, llegando ambos a un total de 530 mm. En cambio, la soja de segunda, con ciclos más cortos, alcanza un consumo máximo de 425 mm. Por último, la curva de consumo en trigo (440 mm) se aparta bastante debido principalmente a la demanda atmosférica baja durante el invierno y la mayor longitud del ciclo.

Para la zona de Balcarce, Buenos Aires, Della Maggiora et al. (2000) midieron el consumo potencial de los 3 cultivos de verano (maíz, girasol y soja) (Tabla

3). El girasol fue el cultivo que tuvo las mayores tasas de ETM máxima diaria o media diaria. Ello es atribuible a su arquitectura que cubre antes la superficie del suelo pero también a la baja resistencia al transporte de agua en la planta (Merrien, 1992). El maíz por tener un porte erectófilo presentó bajas tasas iniciales de ETM, pero debido a la mayor duración de la estación de crecimiento, es el cultivo con mayor ETM.

## Eficiencia del Uso del Agua

La eficiencia del uso del agua (EUA) relaciona la producción de materia seca o rendimiento con la evapotranspiración (ET). La EUA varía entre especies, debido a su tipo de metabolismo C3 o C4, composición de la biomasa, y a las características del uso del

Figura 4. Consumo acumulado de agua (ETM) en cuatro cultivos extensivos. Santa Isabel, Santa Fe, campaña 1998/99 (Andriani, 2000).

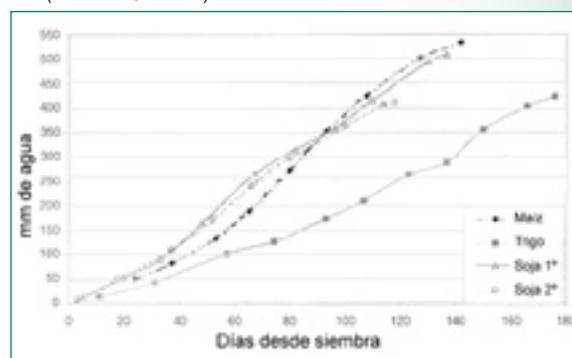


Tabla 2. Coeficientes de cultivo (Kc) medios de maíz, girasol y soja en tres subperíodos de la estación de crecimiento, calculados a partir de datos obtenidos en las campañas 1993-94, 1994-95 y 1995-96 en Balcarce (Della Maggiora et al., 2000).

		Subperíodo			
		Inicial	Máximo	Final	Promedio
Maíz	Kc	0,48	1,24	0,56	0,96
	Fenología# N° días	V <sub>6</sub> 7	R <sub>1</sub> -R <sub>2</sub> 10	R <sub>6</sub> 7	
Girasol	Kc	0,59	1,32	0,68	1,04
	Fenología# N° días	B <sub>8</sub> 7	E <sub>5</sub> -F <sub>4</sub> 10	M <sub>2</sub> 7	
Soja	Kc	0,52	1,08	0,60	0,89
	Fenología# N° días	V <sub>4</sub> 7	R <sub>3</sub> -R <sub>5</sub> 14	R <sub>7</sub> 7	

Tabla 3. Consumo potencial de agua (ETM) y duración media del crecimiento para tres cultivos de verano en tres campañas agrícolas (1993-94, 1994-95, 1995-96) en Balcarce (Della Maggiora et al., 2000).

ETM o consumo de agua #				
Cultivo	Duración media del ciclo (días)	Media diaria estacional (mm día <sup>-1</sup> )	Máxima media diaria (mm día <sup>-1</sup> )	Media estacional (mm)
Maíz	147	4,1	7,6	599
Girasol	109	4,6	8,0	500
Soja	117	4,0	7,6	454

Nota: # los valores de ETM fueron calculados por medio del balance de agua  $ETM = Pp + R^+ - \Delta$  almacenaje

agua, variando también entre climas que condicionan la demanda atmosférica (Tabla 4). Debido principalmente a su metabolismo C4 y al bajo contenido energético de la biomasa reproductiva, el maíz es más eficiente que el girasol y la soja. Es decir que capta mucho más CO<sub>2</sub> por unidad de agua transpirada. En cambio, el girasol tiene un producto con alta concentración de aceite en el grano, por lo que tiene menor tasa de crecimiento por unidad de agua (Andrade y Gardiol, 1994). Por último, la soja presenta una baja eficiencia fotosintética y además un alto contenido energético del grano (Andrade, 1995). La EUA calculada como cociente entre el rendimiento en grano y la ETM fue casi el doble para maíz que para soja y girasol. Debido a la dependencia de la EUA de la condición climática y del manejo del cultivo, la bibliografía informa acerca de un amplio rango de EUA para cultivos con adecuada disponibilidad de agua.

En resumen, conociendo la cantidad de agua requerida por un cultivo para maximizar su rendimiento, las precipitaciones de la zona y la capacidad de almacenaje de agua del suelo (ver Archivo Agronómico No. 6, Septiembre 2002), podemos estimar con mayor precisión los rendimientos esperados de cada cultivo en sistemas agrícolas de secano. El consumo y a la eficiencia del uso del agua son afectados por prácticas de manejo de suelo y cultivo tales como la rotación, el sistema de labranza, el riego, la fertilización, la variedad o híbrido, la fecha de siembra y otras. Estos aspectos serán tratados en un próximo Archivo Agronómico.

## Referencias

**Andrade F.H. y Sadras V.O.** 2000. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. En Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Editores: F.H. Andrade y V.O. Sadras. EEA INTA Balcarce-Fac. de Ciencias Agrarias UNMP. Pp 173-206.

**Andrade F.H. y Gardiol J.M.** 1994. Sequía y producción de los cultivos de maíz, girasol y soja. Boletín técnico 132. EEA INTA Balcarce.

**Andrade F.H.** 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Res.* 41: 1-12.

**Andriani J. M.** 1997. Uso del agua y riego. En "El cultivo de soja en la argentina", editado por Laura Giorda

y Hector Baigorri, EEA Marcos Juárez-INTA. Editorial Editar, San Juan, Argentina, p. 141-150.

**Andriani J. M.** 2000. El agua en los sistemas productivos. Para mejorar la producción, editado por SAGPyA y el INTA-EEA Oliveros, Santa Fe N°13, 72 pp.

**Della Maggiora A.I; Gardiol J.M. y Irigoyen A.I.** 2000. Requerimientos hídricos. En Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Editores: F.H. Andrade y V.O. Sadras. EEA INTA Balcarce-Fac. de Ciencias Agrarias UNMP. Pp 155-171.

**Denmead O.T. y Shaw R.H.** 1962. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. *Agron. J.* 54, 385-390.

**Doorenbos J. y Pruitt W.O.** 1977. Crop water requirements. FAO. Irrigation and Drainage Paper N°24. Rome. Italy.

**Gardner W.R.** 1960a Dynamics aspects of water availability to plants. *Soil Sci*, 89, 63-73.

**Gardner W.R. y Gardner H.R.** 1983. Principles of water management under drought conditions. *Agric. Water Manag.* 7: 143-155.

**Hattendorf M.J; Redelf M.S; Amos B; Stone L.R. y Gwin R.E.** 1988. Comparative water use characteristics of six row crops. *Agron. J.* 80: 80-85.

**Hillel D.** 1990. Role of irrigation in agricultural systems. Pp. 5-31. En: B.A. Stewart y D.R. Nielsen (Eds.). *Irrigation of agricultural crops. Agronomy N°30.* ASA, CSSA y SSSA. Wisconsin. USA.

**Ludlow M.M. y Muchow R.C.** 1990. A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. *Ad Afron.* 43:107-153.

**Merrien A.** 1992. *Physiologie du tournesol.* CETIOM. París.

**Penman H.I.** 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London. Proc. Ser. A.* 193: 120-146.

**Totis de Zeljkovich L; Zeljkovich V; Coca M.G; Blotta L.A; Funston L. y Rivoltella A.** 1991. Balance de agua del doble cultivo trigo-soja y su relación con la productividad en la región de pergamino. Informe técnico N°257. EEA INTA Pergamino.

**Passioura J.B.** 1977. Grain yield, harvest index, and water use of wheat. *J. of Aust. Inst. Agric. Sci.*, 43: 117-120. ■

Tabla 4. Eficiencia de uso del agua (EUA) de tres cultivos de verano en Balcarce (maíz, girasol y soja) de las campañas 1993-94, 1994-95 y 1995-96 (Della Maggiora et al., 2000), de trigo en Pergamino (Totis de Zeljkovich et al., 1991) y los rangos (Hattendorf et al., 1988).

Cultivo	Rinde/ETM (kg ha <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup> )	Rango de valores (kg ha <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup> )
Maíz	18,1	10 – 24
Girasol	7,5	5 – 9
Soja	9,1	5 – 11
Trigo	8,1	