

# BASES ECOFISIOLÓGICAS PARA EL MANEJO DEL AGUA EN CULTIVOS PARA GRANO CONDUCCIDOS EN SECANO

María E. Otegui

Facultad de Agronomía UBA, IFEVA-CONICET, Av. San Martín 4453, Buenos Aires (Argentina)

otegui@agro.uba.ar

## Introducción

La producción de cultivos extensivos de grano persigue la cosecha de una parte de la biomasa total producida durante el ciclo de crecimiento. Dicha biomasa es el resultado final de la captura de recursos ( $\text{CO}_2$ , agua y nutrientes) por parte de las plantas, la cual tiene como principal fuerza motriz a la radiación solar a través de su participación en los procesos de fotosíntesis y transpiración. En condiciones normales de producción, todos los cultivos extensivos se ven expuestos en algún momento de su ciclo a condiciones de demanda atmosférica que normalmente determinan una absorción de agua insuficiente para compensar las pérdidas por transpiración, dando lugar a deficiencias hídricas. A continuación se discutirán los principales factores que determinan los requerimientos hídricos por parte de los cultivos y los efectos que las deficiencias hídricas tienen sobre su productividad, poniendo especial énfasis en las condiciones de producción de los ambientes pampeanos húmedos de Argentina. Se destacarán los factores que condicionan la capacidad de los cultivos para satisfacer la demanda atmosférica de agua, especialmente aquellos asociados con los distintos tipos de suelo y de manejo.

## Rendimiento potencial de los cultivos

Definimos como rendimiento potencial a aquel que para cada especie se obtiene en un ambiente dado en ausencia de estreses abióticos y bióticos. En estas condiciones, el rendimiento depende de la capacidad de fijar carbono a través de la fotosíntesis, la cual estará regulada por la cantidad de radiación que el cultivo sea capaz de interceptar (asumimos al  $\text{CO}_2$  como un recurso de oferta constante por parte de la atmósfera y no sujeto a modificaciones significativas en el corto plazo). En este contexto, las diferentes especies hacen un aprovechamiento diferencial de la radiación incidente (Fig. 1A).

En el caso de trigo con siembra de junio, las mayores capturas de luz tienen lugar en primavera, con valores de irradiancia intermedios y temperaturas frescas que dan lugar a una relación fotothermal apropiada para esta especie. Las siembras tempranas de los cultivos estivales (maíz en inicios de septiembre y soja a mediados de octubre) permiten que los períodos de máxima captura de luz coincidan con los de máxima irradiancia, y aunque las temperaturas también sean entonces elevadas en la región Pampeana, aún se encuentran dentro de rangos óptimos para el crecimiento de ambas especies.

Simultáneamente a la expansión del área foliar para la captura de luz tienen lugar la profundización (Fig. 1A) y proliferación de raíces, que se maximizarán hacia floración y garantizarán la provisión de agua y nutrientes a lo largo del ciclo de los cultivos. En la etapa de prefloración, la biomasa producida se distribuye principalmente entre los destinos vegetativos en expansión (hojas y raíces). A partir de floración adquiere relevancia (o casi exclusividad) el crecimiento de los granos (Fig. 1B). A madurez, para la producción de 6000 kg/ha de trigo habrá sido necesaria una absorción de aproximadamente 180 kg de N/ha y un consumo de agua de aproximadamente 450 mm (Fig. 1C). Estos requerimientos serán muy superiores para la producción de maíz y soja, aunque en el caso

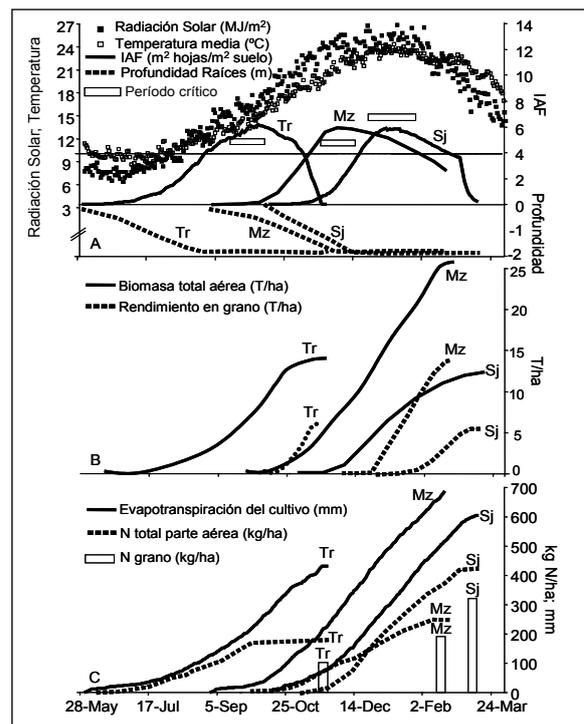


Figura 1. (A) Condiciones de crecimiento durante el ciclo para cultivos de trigo (Tr), maíz (Mz) y soja grupo IV (Sj) en la zona de Pergamino. Se presenta la evolución del índice de área foliar (IAF) y la profundización de raíces. La línea punteada horizontal indica un valor de IAF (aprox. 4) que garantiza elevados niveles de intercepción de luz (>90%). Las barras rayadas horizontales representan la extensión del período crítico de cada especie. (B) Producción de biomasa total y rendimiento en grano de los tres cultivos. (C) Consumo de agua y contenido de nitrógeno de los tres cultivos. Los datos son representativos de ambientes con buena provisión de agua y N.

de la oleaginosa la mayor parte del N provendrá de la fijación simbiótica. Los mayores niveles de irradiancia, que determinan mayor fijación de C, también implican un aumento de la demanda evaporativa, que con buena provisión hídrica se traduce en mayores consumos de agua (Fig. 1C).

### Demanda de agua y evapotranspiración del cultivo

La demanda atmosférica es inherente a cada ambiente y se caracteriza a través de la evapotranspiración potencial ( $ET_0$ ). La principal fuerza motriz de la demanda es la cantidad de radiación solar que alcanza la superficie terrestre, fuente de la energía necesaria para promover el cambio de estado del agua de líquido (en el suelo y las plantas) a gaseoso (en la atmósfera). Factores como el viento y la humedad del aire también condicionan este cambio de estado. La  $ET_0$  puede ser (i) medida a partir de lisímetros, en los cuales se utilizan cultivos de referencia como alfalfa o pasturas, o (ii) estimada con tanques de evaporación o a partir de datos meteorológicos. La  $ET_0$  medida en lisímetros está disponible sólo en pocas localidades, por lo cual habitualmente debe ser estimada.

En condiciones de buena provisión hídrica, el consumo de agua por parte de los cultivos ( $ET_c$ ) se encuentra fuertemente relacionado con su cobertura, representada por el IAF. Este consumo reconoce dos fracciones, la transpiración desde las plantas (T) y la evaporación desde el suelo ( $E_s$ ). La proporción correspondiente a cada una varía con el IAF y con el contenido de humedad del horizonte superficial (Fig. 2A). Consecuentemente, la mayor parte de la  $E_s$  registrada a lo largo del ciclo de un cultivo tiene lugar durante las primeras etapas del mismo y está asociada con la baja cobertura del suelo (Fig. 2B). Lo opuesto ocurre con la componente transpiratoria. La relación entre la  $ET_c$  y la  $ET_0$  representa el coeficiente de cultivo o  $K_c$ , que adquiere valores cercanos o superiores a 1 durante las etapas de máxima cobertura del suelo. En la mayoría de las especies de interés, estas etapas suelen coincidir con los períodos más asociados a la determinación del rendimiento.

### Oferta de agua

La oferta de agua para los cultivos varía fuertemente entre ambientes, en función de la cantidad de precipitaciones propia de cada sitio y su distribución a lo largo del año. Este aspecto, en combinación con el tipo de suelo, condiciona el tipo de cultivo a realizar en condiciones de secano. La habilidad de un cultivo para crecer y producir un rendimiento cosechable en áreas sujetas a sequías periódicas reconoce dos grandes estrategias, el escape al déficit o la tolerancia al mismo. Sin duda, uno de los aspectos más importantes para el éxito de un cultivo en un ambiente con deficiencias hídricas es la adecuación de su ciclo a los cambios temporales de disponibilidad hídrica, especialmente la ubicación de sus *períodos críticos* para la determinación del rendimiento fuera de los momentos de mayor estrés. Así, una de las formas de escape se basa en un rápido desarrollo fenológico, que le permite a la especie cumplir su ciclo en períodos con condiciones hídricas favorables para el crecimiento. Esta estrategia es importante en ambientes con sequías terminales, que tienen lugar a continuación de un período de crecimiento más o menos prolongado (climas mediterráneos y monzónicos), durante el cual la disponibilidad hídrica es siempre adecuada. También se opta por el escape a un déficit cuando se siembra tardíamente, ubicando las etapas vegetativas tempranas durante el período de mayor demanda y los estadios más críticos (vegetativos tardíos prefloración) para la determinación del rendimiento una vez recuperado el balance hídrico positivo. La siembra tardía de maíz y girasol en la región pampeana sería un ejemplo de esta opción de adecuación del ciclo a la oferta del ambiente. La estrategia de tolerancia, que no es excluyente de la anterior e incluye diversos mecanismos, es importante en ambientes donde los períodos de déficit hídrico pueden ocurrir en cualquier momento durante la estación de crecimiento. Esta situación es característica de muchas áreas agrícolas del mundo, donde la cantidad total de precipitaciones supera los requerimientos hídricos de los cultivos pero la variabilidad intra-estacional es grande. La región pampeana se encuentra dentro de este último grupo.

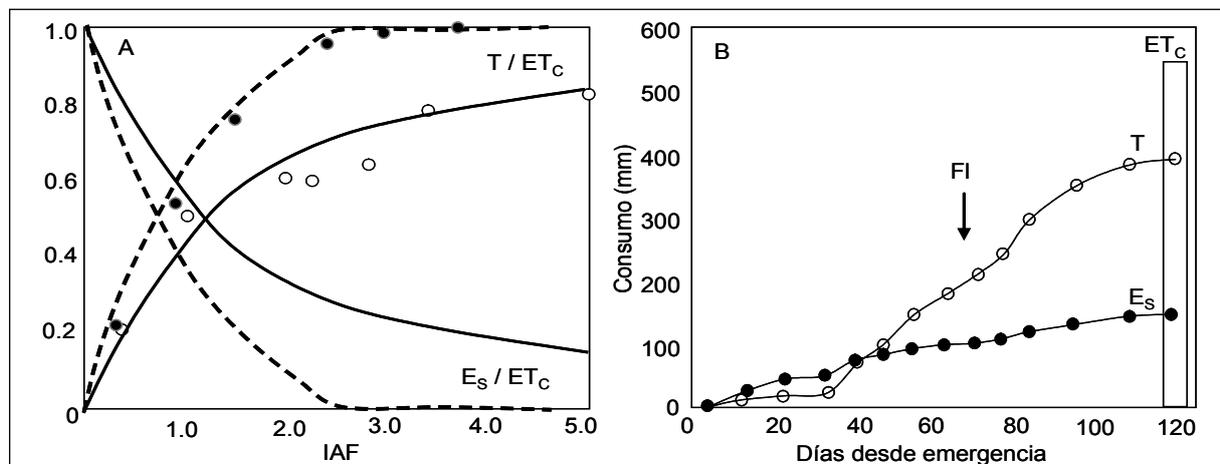


Figura 2. (A) Respuesta de la transpiración (T) y la evaporación del suelo ( $E_s$ ) al índice de área foliar (IAF) de un cultivo de maíz expresada como proporción de la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ). Las líneas punteadas corresponden a una condición de superficie de suelo seca y las llenas a una condición de superficie de suelo húmeda. (B) Evolución acumulada de la T y la  $E_s$ . La barra vertical final representa la  $ET_c$  y la flecha indica el momento de floración. Los datos corresponden a cultivos de maíz de siembra temprana en el sudeste de Buenos Aires.

A la oferta hídrica representada por el régimen de precipitaciones se suma la máxima cantidad de agua disponible para un cultivo que el suelo puede almacenar. Esta cantidad es la que se encuentra retenida entre los potenciales correspondientes al límite superior o capacidad de campo (CC) y el límite inferior o punto de marchitez permanente (PMP). Estos límites, pero no tanto la cantidad de agua extraíble, varían considerablemente con la textura del suelo. Valores típicos de agua extraíble están en el rango de 130-140 mm por metro de perfil, excepto en suelos arenosos donde el agua extraíble alcanza sólo unos 80 mm. Por lo tanto, en la mayoría de los suelos de la región Pampeana sin limitaciones físicas o químicas, el agua total extraíble es similar. Esto, sin embargo, no significa igual disponibilidad para los cultivos. El potencial agua del suelo para la extracción de cada mm de agua remanente cae en forma más pronunciada en las texturas finas (arcillosos) que en las gruesas (arenosos). Así, en los primeros, los cultivos pueden quedar expuestos a condiciones de estrés aún con contenidos elevados de agua disponible, hecho que será más frecuente en ambientes de elevada demanda.

### Absorción de agua, relación oferta-demanda y eficiencia en el uso del agua.

La absorción de agua que puede realizar un cultivo bajo condiciones limitantes de agua depende de (i) factores del suelo, como la cantidad de agua disponible para las plantas y la conductividad hidráulica, (ii) del cultivo, como la densidad y profundidad de las raíces, la conductancia hidráulica de los tejidos vasculares y rasgos tales como la capacidad de ajuste osmótico, y (iii) de la intensidad de la demanda. En suelos sin impedancias al crecimiento (ej. tosca), la profundidad de raíces de todas las especies de grano estudiadas alcanzará los 2 m de profundidad (Fig. 3A), pero el patrón de extracción de agua dependerá de la disponibilidad del recurso a lo largo del ciclo (Fig. 3B). En caso de restricciones hídricas, el aprovechamiento del agua disponible variará con cada cultivo (Fig. 3C) y con el tipo de suelo considerado (Fig. 3D). En estas condiciones se puede verificar una mayor participación de los horizontes profundos en el consumo total de agua del cultivo, que variará a su vez con la conductividad hidráulica de cada uno.

La combinación particular de oferta hídrica, demanda atmosférica y estado ontogénico condiciona el umbral del contenido hídrico del suelo en el cual se manifiestan restricciones al crecimiento (Fig. 4). Estos estreses, principalmente condiciones de déficit hídrico y/o nutricional, afectarán en primera instancia la superficie fotosintetizante, a través de reducciones en la expansión foliar, el macollaje o la ramificación de las plantas, limitando el rendimiento en la medida que reducen la capacidad de captura de luz. En otras palabras, la reducción del IAF provocada por la deficiencia no necesariamente se reflejará en una reducción proporcional de la eficiencia de interceptación de luz. Estreses de mayor intensidad también pueden afectar la eficiencia de conversión de la radiación capturada en biomasa y la partición de biomasa hacia estructuras de cosecha. Así, la producción final de un cultivo se encuentra estrechamente asociada al consumo hídrico del mismo (Fig. 5). La relación entre estas variables define la eficiencia en el uso del agua (EUA), la cual varía entre

especies (ej.  $C_4 > C_3$ ) y condiciones de crecimiento (ej. la EUA disminuye cuando existen restricciones nutricionales o al aumentar el déficit de presión de vapor).

### Déficit hídrico y crecimiento de los cultivos

A campo, los cultivos experimentan durante su ciclo estreses que pueden actuar secuencial o simultáneamente. Los efectos indicados serán tanto más negativos cuanto mayor sea su incidencia (duración e intensidad) alrededor del período crítico por su efecto sobre el número de granos, principal determinante del rendimiento. Consecuentemente, las prácticas de manejo estarán fuertemente condicionadas por las condiciones de crecimiento de cada zona, especialmente el régimen hídrico (Fig. 6). Los pronósticos a largo plazo contribuirían a asistir la toma de decisiones, especialmente la elección de la especie y fecha de siembra ante fenómenos como el ENOS (*El Niño Oscilación del Sur*), cuyos efectos en la región bajo análisis suelen atenuarse de norte a sur. A modo de ejemplo, basado en un ejercicio de simulación, utilizando datos de clima y suelo correspondientes a dos años con disponibilidad hídrica contrastante y fertilización con 100 kg N/ha (Fig. 7), los rendimientos esperables difirieron en una magnitud de casi tres veces para un año clasificado como *Niña* (fuerte deficiencia hídrica) y de otro clasificado como *Neutro* (buena provisión hídrica). Importante destacar que la cantidad estimada de N absorbido por el cultivo en prefloración no difirió sustancialmente entre condiciones hídricas y representó más del 90% del N total absorbido a madurez. Sin embargo, la eficiencia agronómica (kg grano producido por kg de N disponible a la siembra más el N del fertilizante) fue casi tres veces mayor en la situación de buena oferta hídrica (75.8) que en la de sequía (26.9).

### Conclusiones

El rendimiento de los cultivos de grano depende de la captura de recursos a lo largo del ciclo, la cual se encuentra fuertemente modulada por la cantidad de radiación solar incidente, fuerza motriz de los procesos de fotosíntesis y transpiración. Con las prácticas de manejo se afecta sustancialmente este balance, ya sea ubicando al cultivo en épocas de oferta contrastante (fechas de siembra, ciclo del cultivo) o alterando la cantidad total aprovechable de cada recurso (ciclo del cultivo, densidad de plantas, espaciamiento entre hileras, riego, fertilización). La estrategia para la producción de cada cultivo en cada ambiente consistirá en equilibrar la oferta y la demanda de recursos, principalmente durante los períodos críticos. Este objetivo se puede satisfacer considerando la maximización del rendimiento de un cultivo individual o bien la del sistema de producción.

### Bibliografía

- Andrade F., A.G. Cirilo, S.A. Uhart y M.E. Otegui. 1996. *Ecofisiología del Cultivo de Maíz*. Editorial La Barrosa y Dekalb Press. 292 pp.
- Dardanelli J., D. Collino, M.E. Otegui y V.O. Sadras. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. En: 'Producción de Cultivos de Granos. Bases Funcionales para su Manejo'. Editorial Facultad de Agronomía. pp. 377-442.
- Loomis R.S. y D.J. Connor, 1992. *Productivity and Management in Agricultural Systems*. Crop Ecology. Cambridge University Press, Cambridge. ■

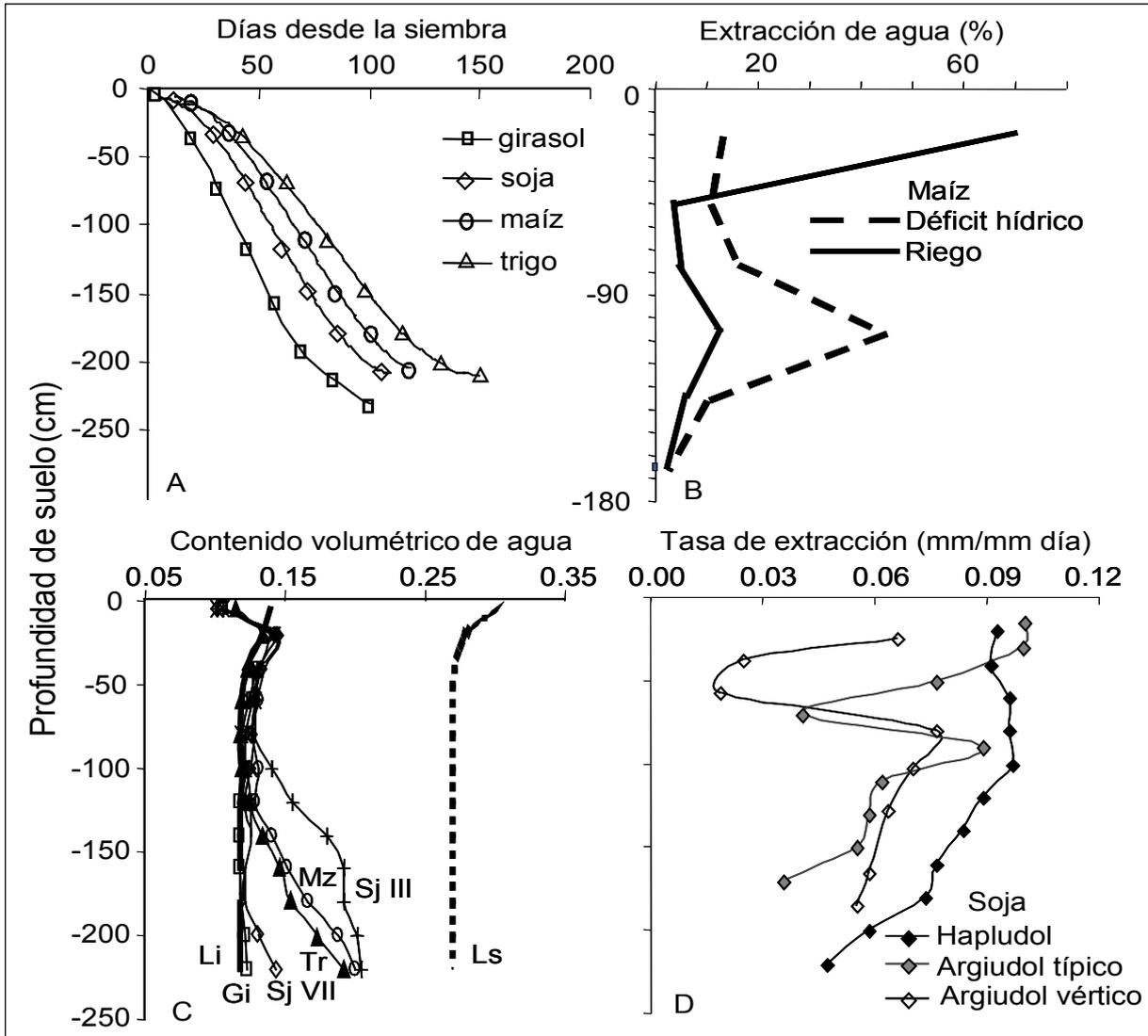


Figura 3. (A) Profundización del sistema radical de cuatro cultivos de grano. (B) Patrón de extracción de agua durante 20 días postfloración (en porcentaje respecto al consumo del período) de un cultivo de maíz en dos condiciones de provisión hídrica. (C) Contenido hídrico del suelo (Hapludol) a madurez de cultivos de soja grupo III (Sj III), maíz (Mz), trigo (Tr), soja grupo VII (Sj VII) y girasol Contiflor 3 (Gi) creciendo sin reabastecimiento de agua suelo desde prefloración tardía. Ls y Li representan los límites superior e inferior de contenido hídrico, respectivamente. (D) Tasa de extracción de agua de un cultivo de soja creciendo en tres suelos contrastantes de la región Pampeana.

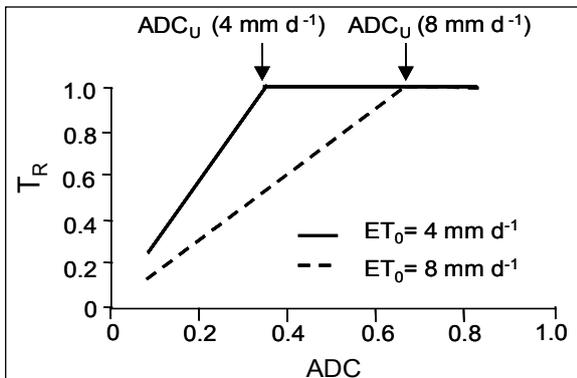


Figura 4. Relación entre la transpiración relativa ( $T_R$ ) y la fracción de agua disponible para el cultivo (ADC). Las flechas señalan el umbral de ADC ( $ADC_U$ ) para dos situaciones de evapotranspiración potencial ( $ET_0$ ). Los datos corresponden a cultivos de girasol alrededor de floración.

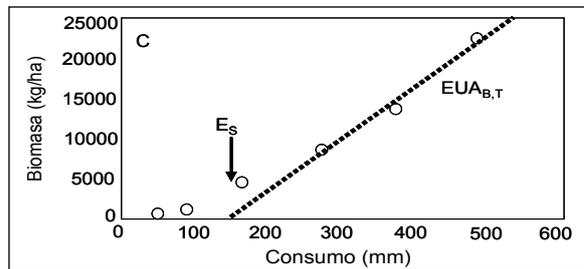


Figura 5. Relación entre la producción de biomasa y el consumo de agua de cultivos de maíz creciendo con buena oferta hídrica y nutricional en el sudeste de Buenos Aires. La flecha representa la evaporación del suelo ( $E_s$ ) estimada y la pendiente de la línea punteada la eficiencia en el uso del agua transpirada para producir biomasa ( $EUA_{B,T}$ ). Esta última corresponde al ajuste por regresión de los datos obtenidos en condición de máxima cobertura del suelo (es decir, cuando se minimiza la componente  $E_s$ ).

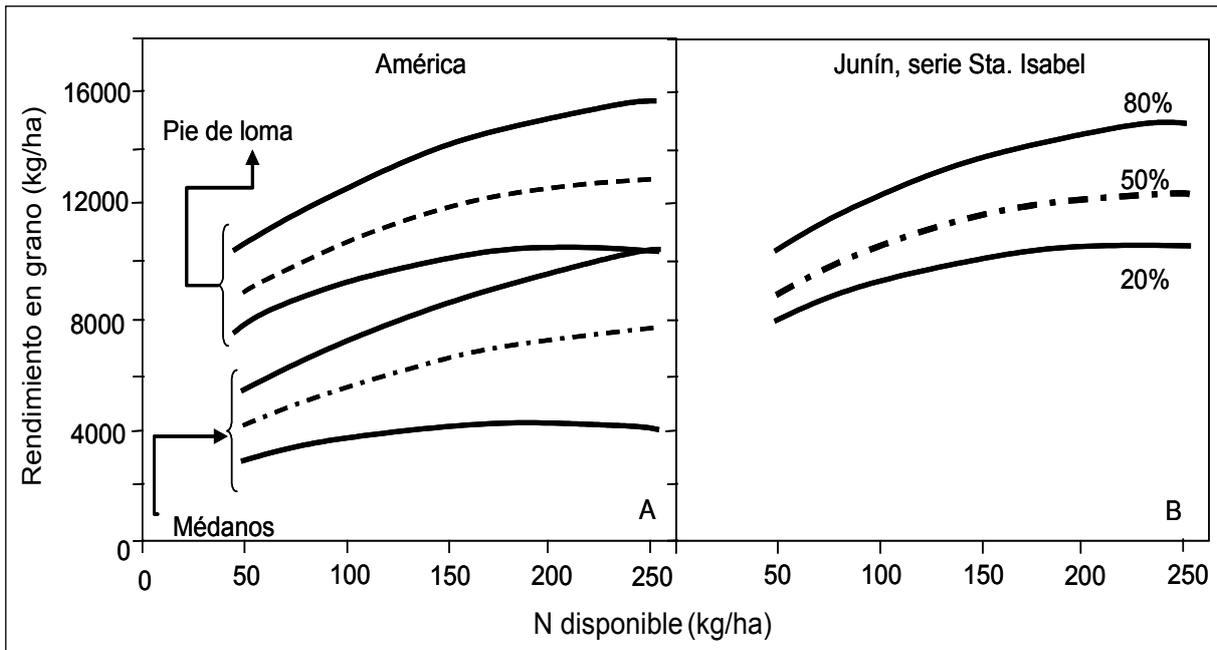


Figura 6. Rendimiento en grano de maíz (14,5% de humedad; híbrido NK900) en función del N disponible (suelo + fertilizante). (A) Condición de lomas planas bajas de América (oeste de Buenos Aires), con buen contenido hídrico a la siembra, 1,4% de C y sin restricciones de P ni S. Se compara con médanos de la misma zona, con bajo contenido hídrico, 0,5% de C y restricción de P. (B) Serie Santa Isabel en Junín (noroeste de Buenos Aires), con buen contenido hídrico, 1,7% de C y sin otras restricciones. En el 60 % de los años se obtienen rendimientos comprendidos entre las curvas representadas por el 20% y el 80%.

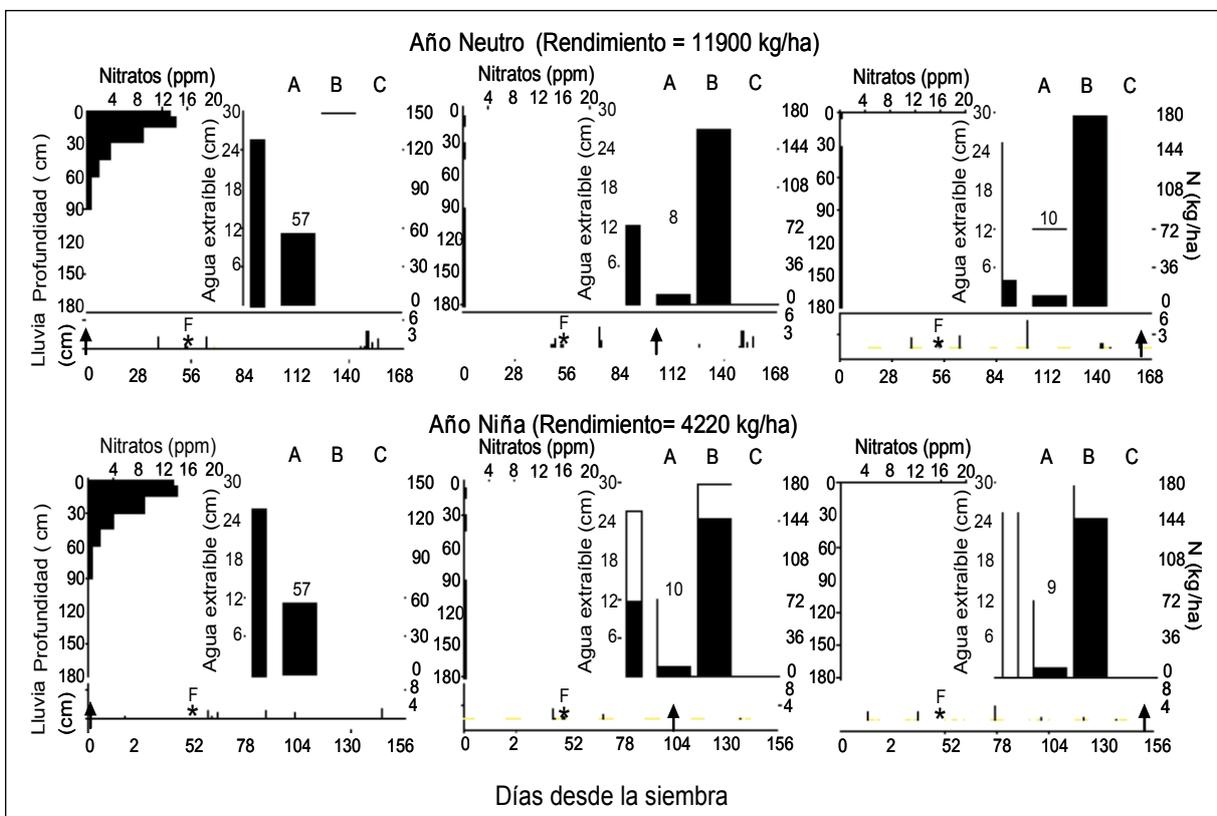


Figura 7. Evolución del agua y el N extraíble por un cultivo de maíz de siembra temprana (1-Sep) en condición de buena disponibilidad hídrica durante el ciclo (año Neutro) o de sequía (año Niña). Las flechas indican el momento de observación (siembra, floración y madurez) y el asterisco el momento de aplicación de 100 kg N/ha. A: N-NO<sub>3</sub> en el suelo, B: N absorbido por el cultivo, C: pérdida de N fuera de la profundidad de extracción (todos en kg N/ha).