

Respuesta Productiva del Trigo Bajo Diferentes Estrategias de Riego Suplementario

R. Marano¹; G. Albrecht²; G. Camussi³, J.M. Picco² y E. Zuccali²

(1) Profesor Asociado, Diagnóstico y Tecnología de Aguas, Facultad de Ciencias Agrarias (UNL)
Kreder 2805, Esperanza (3080), Santa Fe;

(2) Tesinistas carrera de Ing. Agronómica Facultad Ciencias Agrarias UNL,

(3) Docente Diagnóstico y Tecnología de Aguas, Facultad de Ciencias Agrarias UNL
autor de contacto: rmarano@fca.unl.edu.ar

RESUMEN

En la región central santafesina no existe información validada experimentalmente de la respuesta productiva del trigo (*Triticum aestivum L.*) a aplicaciones controladas de agua, por lo que fue llevado a cabo un experimento para evaluar la influencia de diferentes estrategias de riego en: a) partición de materia seca; b) consumo y eficiencia de uso del agua y c) productividad. La experiencia se realizó durante las campañas 2008-09, bajo siembra directa con pivote central abastecido desde el río Coronda y donde se aplicaron tres tratamientos: riego total (RT), riego deficitario controlado (RDC) y secano (S). Se relevaron datos meteorológicos de una estación meteorológica automática, se evaluó fenología y agua en suelo periódicamente y en tres momentos se extrajeron muestras de planta para análisis de componentes de rendimientos. Se utilizaron bloques al azar con tres repeticiones, realizándose análisis de la varianza y comparación según Tukey. El cultivo en 2008 tuvo emergencia normal (294 pl m⁻²) pero climáticamente fue seco, especialmente en otoño, por lo que la recarga del suelo fue insuficiente (100 mm hasta el metro), necesitando varios riegos para cubrir el déficit hídrico. También soportó heladas tardías en espiga embuchada que produjo vástagos infértiles. Por el contrario, 2009 fue una campaña con mayores lluvias y sin graves contratiempos climáticos, por lo que el cultivo expresó todo su potencial. Hubo diferencias altamente significativas en BG entre riego y secano en ambos años, no así entre RT y RDC. La mayor diferencia ocurrió en 2008 (3407 vs 1207 kg ha⁻¹) que 2009 (8093 vs 6919 kg ha⁻¹), a causa del mayor déficit hídrico, que significó que el 1º año se regara entre 112 y 161 mm y al año siguiente sólo 50 mm. También permitió aumentar los rendimientos una mayor densidad de siembra utilizada en 2009 (480 pl m⁻²), altamente recomendable cuando se dispone de riego.

Palabras claves pivote central, Argiudoles, balance hídrico

INTRODUCCIÓN

La región santafesina se caracteriza por tener precipitaciones que alcanzan a satisfacer los requerimientos de evapotranspiración potencial de los principales cultivos debido a que posee un clima húmedo (Cáceres, 1982). Sin embargo, el agua se transforma en una de las principales limitantes para el desarrollo de diferentes cultivos debido a la alternancia de períodos húmedos y secos (Marano *et al.*, 1996), que se presentan en momentos críticos para la definición del rendimiento (p.e. período de llenado de granos). Considerando las precipitaciones y la evapotranspiración de referencia (ET_o), existe probabilidad de ocurrencia de déficit hídricos en invierno y principios de primavera, siendo éstos la principal causa de variación de rendimientos en el cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.) entre distintos años (Camussi y Marano, 2008). Villar (2009) cuantificó en 161 mm el déficit promedio en todo su ciclo, a partir de la evaluación de 22 campañas (1973-94) en la zona centro de Santa Fe.

El riego suplementario es quizá la tecnología que puede provocar el mayor impacto productivo en este cultivo, dado que permite estabilizar los rendimientos durante un período continuo de años (Marano, 2012). Experiencias llevadas a cabo en Esperanza, Santa Fe determinaron que esta técnica produjo un incremento en el rendimiento del 38% respecto a secano. Estas diferencias se explicarían por un mayor número de espigas logradas, debido al crecimiento y supervivencia de más macollos como consecuencia de la mayor disponibilidad del recurso agua (Camussi y Marano, 2008). También deben adecuarse un conjunto de prácticas culturales para obtener rendimientos superiores a 5000 kg ha⁻¹, como mayores densidades de siembra y niveles adecuados de fertilización nitrogenada.

Este cereal es utilizado históricamente en las rotaciones agrícolas en la región Centro-Sur de Santa Fe. Además de su uso con fines alimentarios, tiene efectos beneficiosos en el suelo dado su elevada relación carbono/nitrógeno y su sistema radical en cabellera, que aporta mayor contenido de materia orgánica, mejorando la composición química y la estructura del suelo. Una alta producción de trigo normalmente deja más cobertura y realiza un mayor consumo de agua, lo que da como resultado un perfil de suelo más seco a la cosecha.

La región sureste de la provincia de Santa Fe, departamento San Jerónimo, ubicada en la margen derecha del Río Paraná, se caracteriza por el predominio de tierras con aptitud agrícola-ganadera, clases I a IV, de elevado potencial productivo (INTA, 1991). Éstas han sido utilizadas hasta los años 80' con planteos ganadero-agrícolas en rotaciones con pasturas plurianuales, con un incremento notable en los últimos 25 años del uso agrícola, no adecuadamente controlado desde el punto de vista de la conservación del suelo y con pérdida del patrimonio natural de este recurso (Marano y Pilatti, 1999).

El Río Coronda, brazo del Paraná, con caudal medio de 577 m³ s⁻¹ y excelente calidad química, puede ser utilizado para riego suplementario mediante obras hidráulicas sencillas y con costos relativamente bajos (toma, conducción por canales –parte excavados y parte en terraplén- y estaciones de rebombeo). En cuanto a la calidad química de sus aguas, estudios realizados indicaron su aptitud para riego suplementario, dado que se calificaron como “no salinas” por tener una conductividad eléctrica (CE) menor a 0,3 dS m⁻¹ (Marano y Pilatti, 1999).

Por otra parte, el concepto de estrategias de riego implica determinar en qué etapa fenológica del cultivo aplicar agua (¿Cuándo regar?), y en segundo lugar determinar la lámina de riego a utilizar (¿Cuánto regar?). Estos dos puntos tienen como objetivo principal lograr una mayor eficiencia en el uso del recurso agua, ya que éste compite con otros usos y además la técnica de riego tiene un costo operativo. Investigaciones recientes (Geerts y Raes, 2009) confirman que el riego deficitario permite aumentar la eficiencia de uso del agua (EUa) para diversos cultivos, sin causar severas reducciones de rendimiento. En la región de estudio no existe información validada experimentalmente de la respuesta del trigo a aplicaciones controladas de agua, por lo que el objetivo principal de este trabajo fue evaluar

el impacto productivo de diferentes estrategias de riego suplementario, y en particular, estimar las diferentes necesidades de riego y eficiencias de uso de agua según cada estrategia.

MATERIALES Y METODOS



Figura 1: Imagen satelital del círculo de riego de las campañas 2008 (izquierda), 2009 (derecha) con sus respectivos tratamientos y el canal de abastecimiento de agua (Fuente: elaboración propia en base a imágenes Google earth).

Instalaciones de riego y fuente de agua: El experimento se llevó a cabo en el establecimiento "Miraflores" (Lat. 32°08'S, Long 60°58'W), Santa Fe, Argentina durante las campañas 2008 y 2009. El agua utilizada para riego proviene del río Coronda, brazo del Paraná, que se encuentra a 5 km del lote en estudio. El sistema de riego cuenta con tres pivotes centrales desplazables, utilizándose el menor de ellos para esta experiencia (círculo de 34,2 ha) con cinco posiciones distintas de riego, lo cual permite al productor regar varios lotes en una misma campaña. La desventaja principal de este sistema es que un 21,45% de la superficie, considerando un cuadrado, queda sin regarse.

El agua es conducida hasta el pivote a través de canales parabólicos a cielo abierto -parte excavados y parte en terraplén- que son abastecidos desde el Río Coronda por cinco conjuntos moto-bomba, la principal ubicada en la toma del Río y cuyo caudal aproximado es de $1.300 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (necesario para abastecer a los tres pivotes), y las restantes cuatro ubicadas en diferentes estaciones de rebompeo. En cada posición del centro del pivote, a lo largo del canal, se encuentra una toma fija que se conecta a una moto-bomba portátil con caudal de $150 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, con motor diesel que a su vez propulsa un generador de corriente alterna que alimenta los motores eléctricos del sistema de transmisión del pivote. Éste cuenta con 5 tramos + un voladizo, con un largo total de 330 m, siendo la dosis bruta estándar que aplica el productor de 35 mm, con relé colocado a 15 %.

Suelo: Los lotes donde se realizó el experimento tienen 15 años bajo riego suplementario, con un único tipo de suelo, clasificado como Argiudol-típico, serie MEL I-81, de aptitud agrícola (IP) igual a 81 y textura franco-arcillo-limoso (INTA 1991). En uno de ellos se abrió una calicata hasta 1,2 m de profundidad para extraer muestras de suelo. En ella se extrajeron muestras no disturbadas (cada 10 cm) y se determinó densidad de suelo, según método del cilindro (Forsythe, 1975). Para la determinación de las constantes hídricas que se necesitaron para establecer la dosis de riego, se midió la capacidad de campo (en condiciones reales de campo) y el valor de marchitez permanente se estimó mediante ecuaciones de edafo-transferencia (Ghiberto et al., 2004).

Cultivo y Manejo: En 2008 el experimento comenzó el 1/06 con la siembra en directa del cultivar "Klein Escorpión" (ciclo intermedio), sobre rastrojo de soja y con una densidad de semilla de 120 kg ha⁻¹. De acuerdo a la expectativa de rendimiento (5.000 kg ha⁻¹) y los resultados de análisis de suelo, se determinó aplicar 120 kg ha⁻¹ de urea, 80 kg ha⁻¹ de fosfato diamónico (DAP) y 80 kg ha⁻¹ de SO⁻⁴Ca² al momento de la siembra. Al año siguiente se utilizó otro cultivar, "Cronox" (también ciclo intermedio) sobre rastrojo de maíz, sembrado en directa el día 10/06/ pero con mayor densidad (140 kg ha⁻¹). Para igual expectativa de rendimiento y de acuerdo a los resultados de análisis de suelo, se determinó aplicar 120 kg ha⁻¹ de urea en pre-siembra, 70 kg ha⁻¹ de DAP y 50 kg ha⁻¹ de SO⁻⁴Ca² a la siembra.

El resto de las prácticas culturales (aplicaciones de fitosanitarios, entre otras) fueron igual para todos los tratamientos, según el manejo habitual del productor.

Diseño experimental: Para aplicar diferentes dosis de riego con un pivote central en condiciones reales de campo se necesita modificar la velocidad de avance, es decir, diferentes % del relé. Teniendo en cuenta lo anterior, se seleccionaron dos sitios suficientemente alejados entre sí (Figura 1) donde se demarcaron macro-parcelas de 60 m², aleatorizando los tratamientos con riego total (RT) y riego deficitario controlado (RDC). Fuera del círculo, pero en la esquina correspondiente al mismo cuarto (Figura 1) se demarcó al azar una macro-parcela para el tratamiento testigo (secano, S), también de 60 m². En cada tratamiento se identificaron tres parcelas de 20 m² para utilizarlas como repeticiones.

Balance hídrico: Para estimar la evapotranspiración real o actual (ET_r), se utilizó la siguiente ecuación simplificada de balance hídrico a nivel de lote:

$$ET_r = LR_n + Pe - Per - \Delta H \quad (1)$$

donde:

➤ **ΔH:** representa la variación del contenido de agua en el suelo entre el final e inicio del intervalo, que para este experimento osciló entre 15 y 21 días. De este modo, si la variación fuese negativa, significa extracción de agua por parte del cultivo y en caso contrario, almacenamiento en el perfil de suelo considerado. Para su medición se utilizó una sonda de capacitancia (FDR) modelo Diviner 2000 (Sentek), instalada una en cada parcela (9 en total) que permite obtener lecturas cada 0,10 m hasta 1,6 m de profundidad. Estas lecturas fueron corregidas mediante una calibración obtenida regionalmente (Marano et al., 2012).

➤ **Pe:** precipitación efectiva, considerada como 0,8 de la precipitación total (Pt), cuando ésta fue mayor a 20 mm. Los datos de precipitación se obtuvieron de un pluviómetro ubicado en el propio establecimiento;

➤ **LR_n:** corresponde a la lámina de riego neta, para los tratamientos con riego suplementario;

➤ **Per:** percolación profunda, estimada a través de la variación del contenido hídrico en el estrato inferior donde fue ubicada la sonda (1,6 m).

No se consideró aporte de flujo subsuperficial entrante ni saliente.

Riego: Para la definición de la dosis y el momento oportuno de riego se tuvo en cuenta el agotamiento de la lámina de agua fácilmente utilizable (LAFUT, método estático) de los primeros 0,40 m en RT, resultando dosis fijas e intervalos de riego variable. De este modo, una vez definido el momento de riego, en el tratamiento RDC se aplicó la mitad de lámina respecto a RT. A través de observaciones a campo, se determinó en 35 mm la máxima lámina de riego (LR) que puede aplicar el pivote central sin provocar escurrimientos en su extremo.

Evaluaciones en cultivo:

a) Fenología: se realizó un seguimiento fenológico con intervalos de 15-21 días, utilizando para ello la escala de Zadoks (Zadoks et al., 1974).

b) Componentes del rendimiento: Las variables analizadas fueron: a) biomasa de granos (BG, kg ha⁻¹); b) rendimiento (RG, kg ha⁻¹) determinado a partir de BG y corregido a humedad comercial de 13,5 %; c) peso de 1000 granos (P1000, g); d) número de espigas y de granos por unidad de superficie (NE y NG, respectivamente); e) biomasa aérea total (BAT, kg ha⁻¹) e índice de cosecha (Ic) calculada como la proporción de BG respecto a BAT.

Coefficiente de cultivo: se determinó el coeficiente único de cultivo (K_c , adimensional) para cada tratamiento de acuerdo a Allen et al. (2006). La evapotranspiración de referencia (ET_o , mm) fue estimada según Penman-Monteith (Allen et al., 2006) a partir de datos de temperatura ambiente, presión de vapor, velocidad de viento y radiación global, obtenidos de una estación agrometeorológica automática ubicada a 25 km.

Eficiencias de uso de agua (EU_a):

$$EU_a = \frac{BG}{10 ETr} \quad (2)$$

10 ETr

EU_a se expresa en $kg\ m^{-3}$; BG representa el promedio de cada tratamiento ($kg\ ha^{-1}$) y ETr según los resultados del balance hídrico (mm).

Cuando se utiliza riego suplementario, es posible discriminar la eficiencia de la lámina de agua aportada con el riego (EU_{aLR}):

$$EU_{aLR} = \frac{BG_{riego} - BG_s}{10 (ET_{riego} - ET_s)} \quad (3)$$

donde:

EU_{aLR} se expresa en $kg\ m^{-3}$; BG_{riego} : promedio de biomasa de grano ($kg\ ha^{-1}$) del tratamientos con riego; BG_s : promedio de biomasa de grano ($kg\ ha^{-1}$) del tratamiento testigo; ET_{riego} : evapotranspiración real (mm) de los tratamientos con riego; ET_s : Evapotranspiración real (mm) del tratamiento testigo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Manejo y Condiciones ambientales

Si bien en 2008 el cultivo tuvo emergencia normal (294 pl m^{-2} promedio para todos los tratamientos), la cantidad de plantas m^{-2} debería ser mayor, entre 350-380 pl m^{-2} para cultivos con riego suplementario (Salinas et al., 2007). Este objetivo se logró en 2009, dado que se contaron al 04/07, 485, 442 y 433 pl. m^{-2} para RT, RDC y S respectivamente.

Las precipitaciones del período marzo-octubre 2008 totalizaron 197 mm, representando sólo el 37 % de la precipitación media histórica para ese período, con lo que puede considerarse como un año seco. Por este motivo no se logró una adecuada recarga del perfil de suelo durante el otoño, mientras que en los meses de septiembre y octubre, momento en el cual se ubica el período crítico del cultivo de trigo, éstas solo representaron el 50,1% de la media histórica (Figura 2). La campaña siguiente fue muy diferente, totalizando 512 mm lo que representa 95 % del promedio histórico para esos meses. Sin embargo tuvo una distribución irregular, ya que en los meses de marzo, abril, mayo y junio fueron menores a las históricas (Figura 2), situación que impidió recargar adecuadamente el perfil del suelo durante el otoño. Si bien en julio las precipitaciones fueron importantes, en agosto se agotó la reserva del suelo y recién a partir de la 1° década de septiembre nuevamente se recargó el perfil. Debido a las condiciones de humedad edáfica tan elevadas luego de principios de septiembre no se logró diferenciar los tratamientos bajo riego suplementario.

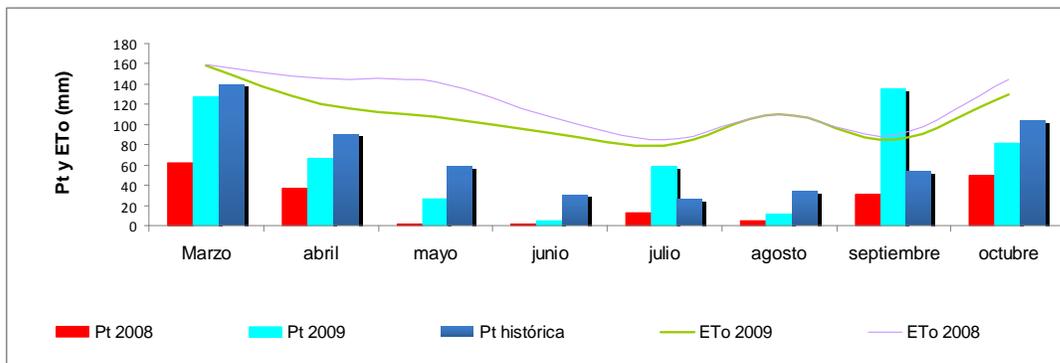


Figura 2: Evapotranspiración de referencia (ETo) mensual y precipitaciones mensuales (Pt) para el período marzo-octubre de los años 2008 y 2009, junto con precipitaciones históricas del período 1970-2005 (Pt histórica) para iguales meses.

La marcha de ETo reflejó las condiciones ambientales (temperaturas y precipitaciones). Se destaca menores valores en setiembre, en coincidencia con mayores lluvias (Figura 2). En cuanto a las temperaturas medias mensuales, en ambas campañas no hubo mayores diferencias con respecto a los valores históricos. Es importante destacar que se registraron heladas tardías en el mes de setiembre de 2008, cercanas a -7°C .

Necesidades de riego y evapotranspiración real

En 2008, en el momento de siembra el perfil del suelo almacenó hasta 1,6 m de profundidad 138 mm, 141 mm y 126 mm de LAFUT para RT, RDC y S respectivamente. Las diferencias entre el área de secano y las de riego probablemente se debieron a la historia agrícola de cada una, resultando la primera con menor capacidad de aprovechamiento de las precipitaciones. El consumo de agua fue similar entre los tratamientos hasta Z; 2,3, momento en que se comenzó a regar debido al déficit hídrico. ETr comenzó a diferenciarse entre los tratamientos bajo riego desde Z; 4,1 (20/9) hasta madurez fisiológica debido a que en este momento comenzó el riego deficitario.

En la campaña siguiente (2009) los valores de agua almacenada en el perfil, hasta 1,6 m, fueron 145, 143 y 138 mm de LAFUT para RT, RDC y S respectivamente. Estos valores resultaron similares a los del año anterior debido a que las lluvias de otoño fueron menores a las históricas. El consumo de agua fue similar entre los tratamientos hasta Z; 3,1 (05/09), siendo hasta ese momento ETo superior a ETr. A partir de allí las demandas hídricas se diferenciaron, siendo menor hasta madurez fisiológica en el tratamiento S. En Z; 6, la ETr de los tratamientos bajo riego alcanzó los niveles de ETo, no ocurriendo lo mismo para el tratamiento de S (Tabla 1).

Tabla 1: Valores acumulados de lámina de riego neta (LRn), precipitación efectiva (Pe), variación de almacenamiento de agua en el suelo (ΔH), evapotranspiración real (ETr) y de referencia (ETo), para RT, RDC y S, campañas 2008 y 2009.

| Cam-paña | Trata-miento | LRn mm | Pe mm | ΔH mm | ETr mm | ETo mm |
|----------|--------------|--------|-------|---------------------|--------|--------|
| 2008 | RT | 161 | 245 | -22 | 428 | 485 |
| | RDC | 111 | | -48 | 404 | |
| | S | 0 | | -19 | 264 | |
| 2009 | RT | 64 | 314 | -146 | 524 | 511 |
| | RDC | 64 | | -110 | 488 | |
| | S | 0 | | -88 | 402 | |

Tabla 2: Láminas de riego netas (LRn) aplicadas durante la campaña 2008, con relación a la fenología y los días a la siembra (DAS), para los tratamientos Riego Total (RT) y Riego Deficitario Controlado (RDC).

| DAS | Fenología | LRn (mm) | |
|-----|-----------|----------|-----|
| | | RT | RDC |
| 76 | Z; 2,3 | 26 | 26 |
| 86 | Z; 3 | 31 | 31 |
| 112 | Z; 4,1 | 64 | 47 |
| 127 | Z; 6,8 | 20 | 0 |
| 132 | Z; 7,5 | 20 | 7 |

a) Riego total (RT)

En 2008 el riego comenzó cuando se agotó LAFUT, considerando 0,40 m de espesor (Tabla 2). En Z; 3,2 (07/09) se produjo un aumento importante de la tasa de extracción de agua, especialmente en los primeros 0,20 m del perfil, disminuyendo el contenido hídrico por debajo del umbral crítico ($\Delta H = -37$ mm). Si bien en esta etapa se podría haber regado, se consideró que el agua almacenada a mayor profundidad sería suficiente para satisfacer el normal crecimiento del cultivo. El análisis del perfil hídrico indicó la necesidad de aplicar riegos semanales, que fueron de menor magnitud en antesis porque ocurrieron algunas precipitaciones (Tabla 2, Figura 3 a). El último riego se aplicó en llenado de granos, considerando que a partir de este momento nuevas aplicaciones no redundan en mayor productividad y eficiencia de uso de agua. El valor de LAFUT resultó nulo al final de este período (Figura 3 a). En madurez fisiológica (Z; 8) se produjeron precipitaciones importantes y dado que en esta etapa disminuye drásticamente E_{Tr} , siendo la mayor proporción de agua consumida por evaporación directa desde el suelo, el perfil pudo ser recargado para el cultivo siguiente (Figura 3 a).

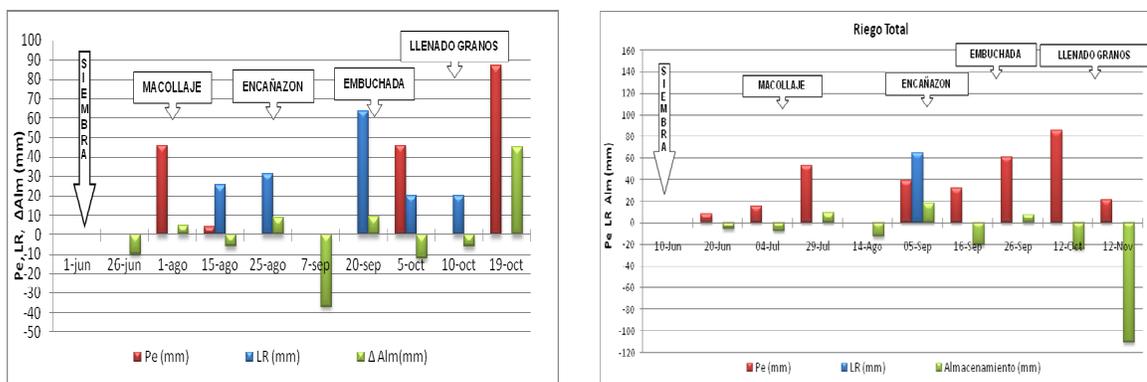


Figura 3: Precipitación efectiva (Pe), lámina de riego (LR), variación de almacenamiento de agua en el suelo (ΔH) hasta 1,6 metros de profundidad en riego total (RT) a lo largo del ciclo de cultivo para las campañas 2008 (a, izquierda) y 2009 (b, derecha).

En 2009, debido a que fue una campaña con mayor magnitud de precipitaciones, el inicio del riego suplementario se prolongó casi 30 días respecto al año anterior (Z; 3,1, Figura 3 b), con una única aplicación (Tabla 1). Luego las Pe fueron superiores a la histórica, lo que permitió satisfacer ampliamente los requerimientos hídricos del trigo (Figura 3 b).

b) Riego Deficitario Controlado (RDC)

En 2008, hasta el estado Z; 4,1 (20/09) RDC se comportó similar a RT debido a que se regaron de igual modo y a partir de allí los tratamientos se diferenciaron (Tabla 2). En Z; 6,8 no se regó para forzar el tratamiento y poder diferenciarlo de RT y al final del ciclo (Z; 8), las lluvias ocurridas permitieron que la recarga del perfil fuera levemente superior que en RT (Figura 4 a).

Mientras que en RDC se aplicaron 50 mm menos que en RT, ΔH durante el período de restricción hídrica (20/09 a 10/10) fue, en promedio, -8,6 y -22,1 mm para RT y RDC respectivamente. Esto significó que el tratamiento con déficit controlado extrajera más cantidad de agua del suelo y a mayor profundidad, aunque sin compensar la cantidad extra de riego aplicada. Por esta razón E_{Tr} acumulada fue menor con respecto a RT (Tabla 1).

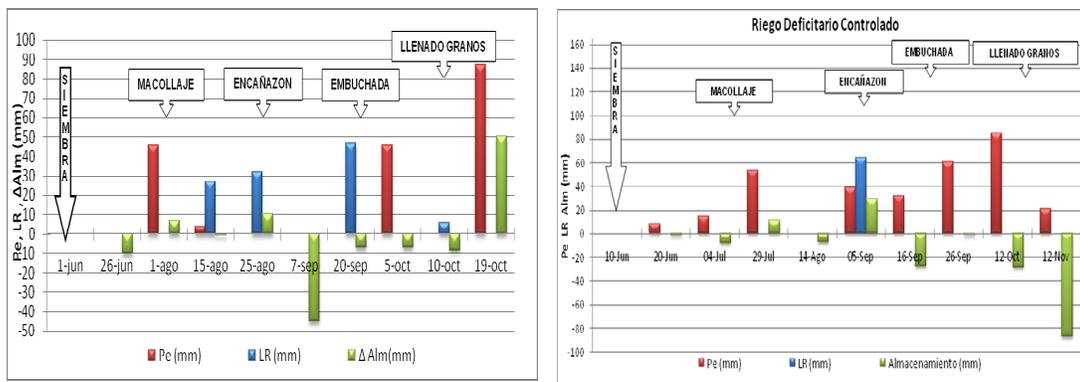


Figura 4: Precipitación efectiva (Pe), lámina de riego (LR), variación de almacenamiento de agua en el suelo (Δ Alm) hasta 1,6 metros de profundidad en RDC a lo largo del ciclo de cultivo para las campañas 2008 (a, izquierda) y 2009 (b, derecha).

En la campaña siguiente el comportamiento de este tratamiento fue similar a RT ya que tuvieron igual LR. Debido a que las precipitaciones fueron superiores a la histórica, en este ciclo no se pudo lograr un riego deficitario controlado. A diferencia de RT, este tratamiento extrajo menos agua desde el suelo y por ende E_{Tr} del ciclo fue menor (Tabla 1).

c) Secano (S)

En 2008, desde el inicio del déficit hídrico (Z; 2,2 -15/08) hasta Z; 6,5 (5/10) el consumo fue parcialmente provisto por el agua útil almacenada a mayor profundidad en el perfil de suelo, dado que no se produjeron precipitaciones. Por este motivo el cultivo comenzó a presentar signos severos de estrés hídrico (Figura 5 a). En Z; 6,5 (1 5/10) y en Z; 7,8 (19/10) se produjeron precipitaciones que permitieron un leve aumento de ΔH (Figura 5 a), aunque el consumo total de agua (E_{Tr} acumulada) representó sólo el 54 % de E_{To} acumulada.

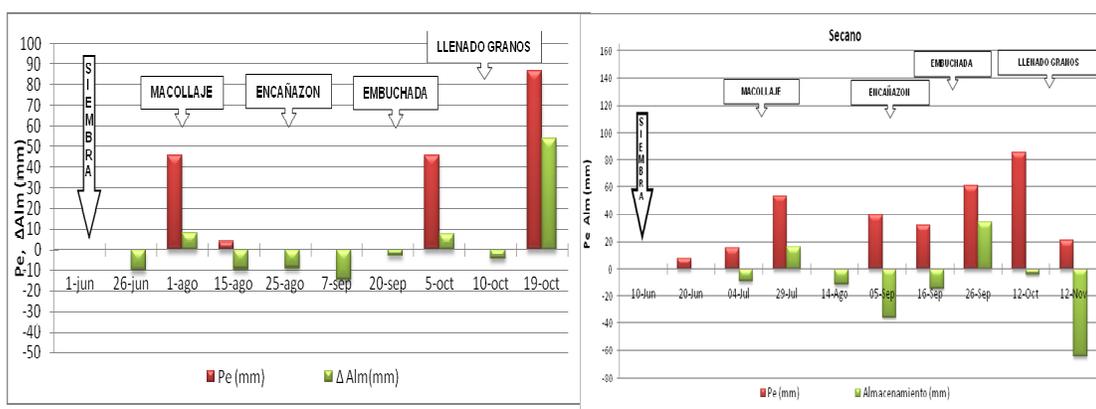


Figura 5: Precipitación efectiva (Pe), variación de almacenamiento de agua en el suelo (ΔH) hasta 1,6 metros de profundidad en S, a lo largo del ciclo de cultivo para las campañas 2008 (a, izquierda) y 2009 (b, derecha).

En 2009, a diferencia de los tratamientos irrigados, S en Z; 3,1 (05/09) tuvo una variación de almacenaje notablemente negativa y el 26/09 una variación positiva (Figura 5 b) debido a las elevadas precipitaciones ocurridas en septiembre. Al finalizar el ciclo del cultivo, LAFUT se había agotado por completo (Figura 5 b).

Considerando el balance hídrico, la principal componente que aporta al total de agua consumida por el cultivo es P_e . Para la campaña 2008, las proporciones fueron 57, 61 y 93 % para los tratamientos RT, RDC y S respectivamente. Estos porcentajes se mantuvieron al año siguiente en los tratamientos RT y RDC (60 y 64 % respectivamente), pero cambió notablemente para el testigo, con una disminución en la participación de las lluvias (78 %). Las componentes LR_n y ΔH ocupan alternativamente el segundo y tercer lugar, según la condición hídrica. En 2008, año seco, LR_n representó 38 y 28 % de E_{Tr} para RT y RDC respectivamente, mientras el agua en el suelo sólo aportó entre 5 y 12 %. En tanto en un año húmedo (2009), LR_n disminuyó a 12 y 13 % (RT y RDC respectivamente), mientras ΔH representó 28, 23 y 22 % para RT, RDC y S respectivamente. Por otra parte, el valor de LR_n para RT en 2008 fue igual al encontrado por Villar (2009) para la región central de Santa Fe.

Coefficiente de cultivo (K_c)

La evolución de este coeficiente en ambas campañas fue diferente, sólo coincidiendo el momento del máximo valor de K_c , que ocurrió aproximadamente a 110 días de la siembra. En 2008 K_c tuvo un comportamiento similar en todos los tratamientos hasta Z ; 2,1 (día 61, Figura 6 a). A partir de allí, debido a las deficiencias hídricas en los primeros centímetros (0,40 m) se comenzó con el riego, lo cual produjo un desigual consumo de agua entre S y los tratamientos irrigados. En éstos la curva continuó con la tendencia del período anterior, mientras que en S cayó abruptamente. En Z ; 3,1 (DAS 98) la tasa de consumo de agua fue prácticamente nula en S ($K_c=0,07$) debido al severo estrés hídrico en el que se encontraba este tratamiento (Figura 6 a). En Z ; 3,7 (día 111) K_c tuvo valores máximos en RT ($K_c=1,53$), mientras que en RDC fueron menores ($K_c=1,03$) debido a las diferentes láminas de LR. A partir de este momento K_c comenzó a declinar en todos los tratamientos, más pronunciadamente en RDC y en S debido a que la tasa de extracción continuó siendo elevada, pero en esta fecha (DAS 127) sólo se aplicó riego en RT (Tabla 2). En este tratamiento y para igual fecha, la curva presenta una leve depresión (Figura 6a), indicando que la lámina aplicada probablemente debería ser mayor. Desde Z ; 7,5 (DAS 131) hasta cosecha (DAS 166) aumentaron los valores de K_c de RDC y S (Figura 6 a) debido a las precipitaciones ocurridas (Figura 4a y 4b). Es probable que el valor final de 0,83 para S se deba más a evaporación directa del suelo antes que a la transpiración del cultivo.

En la campaña siguiente K_c tuvo un comportamiento similar en todos los tratamientos hasta Z ; 4,3 (DAS 98). En este período se destaca un momento (Z ; 2,3 DAS 65) con menor E_{Tr} en todos los tratamientos, probablemente debido a tasas de E_{To} relativamente altas para la fecha (E_{To} diaria= $2,9 \text{ mm día}^{-1}$) y rápido agotamiento del agua útil a 0,40 m de profundidad (Figura 6 b). Este punto de la curva se pudo comprobar porque el intervalo de medición de agua en el suelo fue 15 días. En la medición siguiente ya se había recuperado el consumo de agua en todos los tratamientos y por ende K_c aumentó hasta Z ; 4,3, etapa en la cual E_{Tr} del tratamiento testigo comenzó a disminuir debido a las altas tasas de E_{To} , que no pudieron ser repuestas en su totalidad por el agua útil almacenada en el suelo (Figura 6 b). Los tratamientos irrigados tuvieron igual comportamiento debido a que no se pudieron diferenciar, como ya fuera mencionado, alcanzando valores máximos de K_c (aproximadamente 2) en anthesis (Z ; 6 DAS 108). En S no fue igual debido al déficit hídrico ocurrido en esta etapa, aunque pudo recuperar la tasa de E_{Tr} debido a las elevadas precipitaciones ocurridas a fines de septiembre. Hacia finales de la etapa de llenado de granos (DAS 130 aproximadamente), todos los tratamientos descendieron notablemente su consumo debido al comienzo de madurez fisiológica (Figura 6 b).

En relación a los tres valores clásicos de K_c (inicial, mediados y final) necesarios para obtener la curva, los resultados de ambas campañas indican que, para la etapa inicial, oscilaron entre 0,25 y 0,4; para la etapa de máximo valor de K_c , estos fueron entre 1,5 y 1,9, mientras que para finales, entre 0,65 y 1. El trabajo de FAO 56 (Allen et al.,2006) refiere valores para trigo de invierno sin congelar de 0,7, 1,15 y 0,4 para inicios, mediados y final respectivamente.

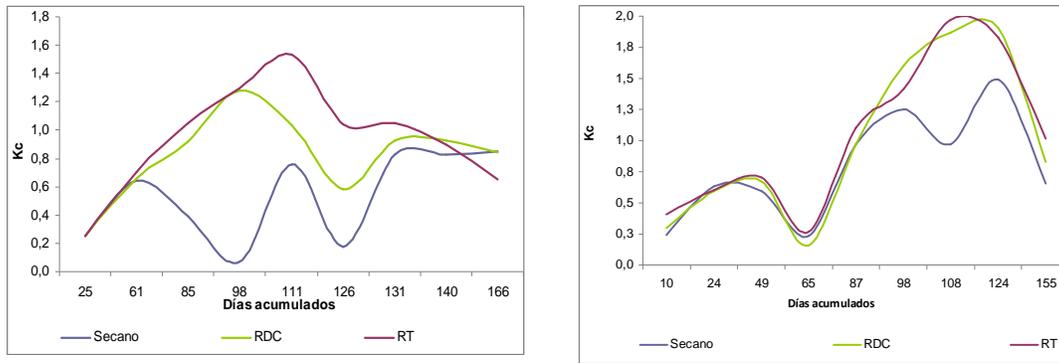


Figura 6: Coeficiente de cultivo único (Kc) en función de los días acumulados a la siembra (DAS) para los tratamientos Riego Total (RT), Riego Deficitario Controlado (RDC) y Secano (S), campañas 2008 (a, izquierda) y 2009 (b, derecha)

Componentes del rendimiento

En 2008 los rendimientos fueron significativamente mayores en los tratamientos irrigados respecto al testigo ($p < 0,05$) aunque sin diferencias significativas entre RT y RDC (Figura 7). Cabe aclarar que el tratamiento RT fue trillado a máquina por error, y que el rendimiento fue estimado a través del mapa de rendimiento de la cosechadora (Ing. Lieber B., com. pers.). Los rendimientos proyectados no se alcanzaron probablemente debido a que la densidad de siembra fue baja (Salinas, *et al.*, 2007) y también a heladas tardías ocurridas en el mes de septiembre (Magra, *et al.* 2006) que disminuyeron el número y la viabilidad de las espigas. Un ensayo realizado por INTA en el mismo establecimiento, en secano, tuvo rendimientos promedio de 995 kg ha^{-1} , con máximos de 1536 y mínimos de 652 kg ha^{-1} (Ing. Albrecht R., com. pers.).

Las variables RG, BAT, Ic, P1000, NG m^{-2} y NE m^{-2} presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en el tratamiento RDC respecto al testigo debido al fuerte estrés hídrico sufrido por este último (Tabla 3).

En un experimento con riego suplementario realizado en la misma región (Camussi y Marano, 2008), se obtuvieron valores superiores de RG comparando los tratamientos con riego total (3.951 kg ha^{-1}). Los mayores rendimientos son consecuencia de un mayor NG m^{-2} y mayor NE m^{-2} (11.229 granos m^{-2} y 714 espigas m^{-2}) respectivamente.

En 2009, RG entre los tratamientos irrigados no tuvo diferencias significativas ($p < 0,05$), siendo 8.128 y 8.057 kg ha^{-1} para los tratamientos RDC y RT respectivamente. No ocurrió lo mismo con respecto al testigo, alcanzando 6.919 kg ha^{-1} (Figura 7). No obstante, la expectativa de rendimiento prevista (5.000 kg ha^{-1}) fue superada ampliamente por los resultados obtenidos en todos los tratamientos. En otro ensayo realizado por INTA en el mismo establecimiento y también en secano, presentó valores de RG promedio de 4.517 kg ha^{-1} , con máximos de 5.462 y mínimos de 3.745 kg ha^{-1} (Ing. Albrecht R., com. pers.).

Las diferencias encontradas en RG entre los tratamientos irrigados y el testigo se debieron a que hubo diferencias significativas ($p < 0,05$) en la componente P1000 (Tabla 3). El déficit hídrico en S comenzó en Z; 4,3, se prolongó hasta inicios de floración, y aunque hubo lluvias que recargaron parcialmente el perfil superficial del suelo (Figura 5 b), ya en Z; 7 se había agotado LAFUT y como consecuencia tuvo un menor tiempo de llenado de granos. Sin embargo las tasas de ETr nunca fueron menores a las tasas de ETo en todo este período, por lo que puede considerarse aquél déficit como moderado y de allí que los valores promedios de RG fueran tan elevados.

Las mejores condiciones de fertilidad química del lote donde se realizó el experimento en 2009 (principalmente fósforo), pudieron influir en los mayores rendimientos alcanzados en esta campaña comparada con la anterior. Otras causas fueron la mayor cantidad de espigas logradas, consecuencia de la mayor densidad de siembra, y ausencia de heladas tardías.

En esta campaña se superaron los resultados presentados por Camussi y Marano (2008) en todas las componentes de rendimiento.

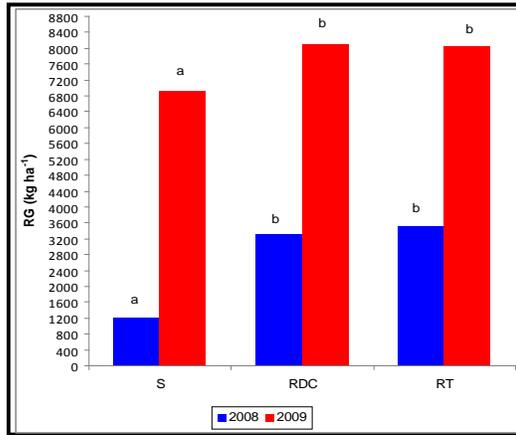


Figura 7: Valores medios de rendimiento de grano (RG, kg ha⁻¹) para Secano (S), Riego Deficitario Controlado (RDC) y Riego Total (RT) para las campañas 2008 y 2009. Letras diferentes para una misma campaña indican diferencias significativas (Test de Tukey, p<0,05).

Tabla 3: Valores medios de Biomasa Aérea Total (BAT), Índice de Cosecha (Ic), Peso de mil Granos (P1000), Número de Granos (NG) y Número de Espigas (NE) por unidad de superficie de los tratamientos RT, RDC y S, campañas 2008 y 2009.

| Campaña | Tratamientos | BAT kg ha ⁻¹ | Ic. | P1000 G |
|---------|--------------|-------------------------|--------------------|---------|
| 2008 | RDC | 8.606 a | 0,34 a | 31,9 a |
| | S | 4.303 b | 0,25 b | 18,4 b |
| 2009 | RT | 14.171 a | 0,49 a | 33,6 a |
| | RDC | 14.771 a | 0,48 a | 34,0 a |
| | S | 14.527 a | 0,41 b | 30,9 b |
| | | NG m ⁻² | NE m ⁻² | |
| 2008 | RDC | 9.127 a | 531 a | |
| | S | 5.651 b | 443 b | |
| 2009 | RT | 21.141 a | 768 a | |
| | RDC | 21.095 a | 762 a | |
| | S | 19.754 a | 719 a | |

Letras diferentes en las columnas indican diferencias significativas según Tukey (p<0,05) para cada campaña.

Eficiencia de uso de agua (EUa) y eficiencia de uso de agua de la lámina de riego (EUa_{LR})

Los mayores valores, tanto de EUa como EUa_{LR}, ocurrieron durante la campaña 2009. El año 2008 presentó valores muy bajos de EUa en todos los tratamientos debido a la baja productividad del cultivo, de tal modo que el tratamiento testigo en 2009 fue mayor que los tratamientos bajo riego de la campaña 2008 (Tabla 4). RDC fue igual e incluso algo superior (2009) que RT, lo cual indicaría al primero como una técnica que puede optimizar el uso del agua. En 2009 el testigo fue mayor que el resto de los tratamientos (Tabla 4), debido a que la diferencia de BG respecto a los tratamientos irrigados fue proporcionalmente menor que la diferencia de ETr.

Castellarín et al. (2005), en una experiencia con trigo llevada a cabo en Oliveros, Santa Fe, distante 80 km al sur y también con riego, obtuvieron valores de EUa de 1,1 kg m⁻³, intermedio entre los valores de este trabajo. En tanto en secano fue algo menor (1,03 kg m⁻³), también intermedio entre las campañas 2008 y 2009 del presente trabajo. La menor EUa obtenida en S con este experimento en relación al mencionado anteriormente, probablemente se explica por el marcado déficit que hubo desde Z; 2,3 hasta Z; 7 en la campaña 2008, provocando mermas en RG.

Considerando EUa_{LR}, los resultados entre RDC y RT variaron en cada campaña (Tabla 4). Esto se debe a que, por un lado RDC tuvo rendimiento similar (2008) o levemente mayor (2009) a RT pero LR fue 30,4 % menor (2008) o igual (2009), lo que indica que la técnica de riego deficitario controlado puede optimizar el agua aplicada. En la experiencia antes mencionada el valor fue 1,35 kg m⁻³ (Castellarín et al., 2005) para condiciones de riego total, muy similar a la campaña 2008. Se puede decir entonces que para las condiciones del sur-este santafesino, los valores de EUa_{LR} oscilan entre 1, 3 y 1,7 kg m⁻³.

Tabla 4: Eficiencia de uso de agua (EUa) para los tratamientos RT, RDC y S; y eficiencia de uso de agua de la lámina de riego (EUa_{LR}) para los tratamientos RT y RDC, para ambas campañas.

| Campaña | Variable | S | RDC | RT | Campaña | Variable | S | RDC | RT |
|---------|--------------------------------------|------|------|------|---------|--------------------------------------|------|------|------|
| 2008 | EUa kg m ⁻³ | 0,40 | 0,72 | 0,72 | 2009 | EUa kg m ⁻³ | 1,52 | 1,45 | 1,35 |
| | EUa _{LR} kg m ⁻³ | | 1,24 | 1,31 | | EUa _{LR} kg m ⁻³ | | 1,67 | 1,57 |

CONCLUSIONES

- a) Se confirma que el riego suplementario es una tecnología que permite incrementar los rendimientos del trigo. Por ello es fundamental utilizarla en función de los requerimientos de los cultivos como así también, de la cantidad de agua con que se cuenta en el perfil del suelo al momento de la siembra, de modo de optimizar su uso.
- b) En cuanto a las dos estrategias de riego aplicadas, ambas tienen sus pro y sus contra:
 - Teniendo en cuenta que en la región central de Santa Fe el perfil del suelo normalmente se recarga a partir de las precipitaciones de otoño y mediados de primavera (octubre), la estrategia RDC permite economizar el uso del recurso agua, energía eléctrica y combustible disminuyendo así los costos variables sin impactar sobre los rendimientos.
 - En contraposición, si el año climático fuera anormal y no se lograra recargar el perfil de suelo con agua, teniendo en cuenta que el productor siembra maíz (mediados de septiembre) y soja de 2^{da} (sobre rastrojo de trigo), la estrategia RT permite dejar en el perfil mayor LAFUT para este último cultivo, liberando el equipo de riego para destinarlo a maíz.
- c) La determinación del momento oportuno de riego se realizó en función del balance hídrico, tomando como indicadores LAFUT y la aproximación de la profundidad que estaban explorando las raíces en función de cada feno-fase. Se evitó en lo posible, el agotamiento de LAFUT a la profundidad que se encontraban las raíces. Es decir cuando LAFUT se encontraba cercano a cero, se aplicó una determinada LR.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M, 2006. Evapotranspiración del Cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio para Riego y Drenaje 56, FAO, Roma
- Cáceres, L. M. 1982. Caracterización climática de la prov. De Santa Fe. Min. Agr. y Gan., D.G. Suelos y Aguas.
- Camussi, G. F.; Marano, R. P. 2008. Respuesta del trigo al riego suplementario en la región central de Santa Fe. Revista FAVE 7 (1-2): 7-21.
- Castellarín, J.M.; Salvagiotti, F.; Andriani, J.; Pedrol, H.M.; Rosso, O. & Dignani, D. (b) 2005. "Influencia de la disponibilidad de agua y de la radiación sobre parámetros fisiológicos en cultivares de trigo con diferente estructura de canopeo." 7^a Conferencia Mundial de Trigo. Mar Del Plata (Buenos Aires). INTA EEA Oliveros. Serie N° 31, p. 11-13. Disponible en: www.inta.gov.ar/oliveros/
- Forsythe, W. 1975. Manual de laboratorio de física de suelos. IICA. Serie libros y materiales educativos 25. San José, Costa Rica. 212 p.
- Geerts, S.; Raes, D. 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. <http://www.elsevier.com/locate/agwat.pdf>

- Ghiberto, P.J.; Pilatti, M.A.; Imhoff, S. Curva de retención hídrica en Molisoles de Santa Fe: función representativa. In: XIX congreso argentino de la ciencia del suelo: cambio en el uso de la tierra: educación y sustentabilidad, 2004, Paraná. cd room XIX congreso argentino de la ciencia del suelo: Cambio en el uso de la tierra: educación y sustentabilidad. AACCS, 2004.
- INTA Rafaela. 1991. Carta de suelos de la República Argentina. "Gálvez-Barrancas", Santa Fe.
- Magra G., Senn J., Martín, R. 2005. Evaluación del daño provocado por heladas tardías en trigo. Revista Agromensajes de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Nacional de Rosario. <http://www.fcagr.unr.edu.ar/Extension/Agromensajes/17/15AM17.htm>
- Marano, R. P., Pilatti, M.A.; Pecorari, C.A. ; Weidmann, P. 1996. Riego suplementario en la cuenca lechera del centro-este Santa Fe. Revista Miscelánea. N° 77. EEA INTA Rafaela.
- Marano, R. P.; Pilatti, M. A. 1999. Riego suplementario con aguas superficiales en Santa Fe. Revista FAVE 13 (2): 41-60.
- Marano, R. P. 2012. El río Paraná como fuente de agua para riego en la Pcia. de Santa Fe: Desafíos y Oportunidades. VI Jornadas de Riego y Fertirriego, Mendoza, Argentina.
- Marano, R. P.; Ledesma, F.; Camussi, G. y Carnevale, I. 2012. Uso de sondas FDR para balance de agua en suelo: calibración y aplicación. In: Actas XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo / 1ª edición. Ed. MNEMOSYNE, Mar del Plata, 2012. ISBN 978-987-1829-11-8.
- Salinas A., Giubergia J., Martellotto E., Lovera E., Basanta M., Lingua S., Alvarez C., Viglianco O., 2007. Densidad de siembra y rendimiento en grano de diferentes variedades de trigo bajo riego. Boletín de Divulgación Técnica N°1: 23-28
- Villar, J. 2009 "Estimacion de rendimiento de trigo a partir del agua almacenada en el centro de Santa Fe." INTA, EEA Rafaela. <http://www.inta.gov.ar/rafaela/>.
- Zadoks, J., T. Chang & C. Konzak. 1974. A decimal code for the growth stage of cereals. Weed Research 14:415-421.