

DIAGNOSTICAR LAS RESERVAS DE AGUA ÚTIL: UNA HERRAMIENTA PARA LA TOMA DE DECISIONES Y POTENCIAR LA RENTABILIDAD ECONÓMICA DEL CULTIVO DE TRIGO

Gustavo Cesar Magra
Andrés José Saperdi
Laura Alejandra Ferreras

Departamento Ciencias de la Tierra y Tecnología, Facultad de Ciencias Agrarias,
Universidad Nacional De Rosario
Correo electrónico: magra@hotmail.com

RESUMEN: El doble cultivo Trigo/Maíz es una alternativa viable, puesto que contribuye a incrementar la producción mediante el uso más eficiente de los recursos. El trigo se cultiva en una estación con escasas precipitaciones, por lo tanto, bajo condiciones de secano la oferta hídrica depende en parte de las reservas del suelo. El objetivo del trabajo fue determinar el contenido de agua útil a la siembra y durante el ciclo de crecimiento de cultivos de trigo en secuencias con elevado índice de intensificación. Se evaluaron seis sitios con la secuencia Trigo/Maíz-Maíz ubicados en la provincia de Santa Fe (Argentina), durante los ciclos 2012-2021. Se realizó el seguimiento mensual del contenido hídrico en estratos de 20cm, hasta la profundidad de 120cm. Se calculó por estrato la disponibilidad de agua útil (DAU) y su relación con respecto a la máxima capacidad de retención. Se realizó un análisis de varianza y la separación de medias fue obtenida por el test de Tukey ($p < 0,05$). A la siembra, la DAU osciló entre 145-260mm en los 120cm de profundidad. La DAU relativa presentó diferencias interanuales durante la implantación ($p < 0,05$). Los ciclos con menor DAU relativa coincidieron con menor recarga pluviométrica ($< 200\text{mm}$); mientras que $\text{DAU} > 80\%$, correspondieron a los años con lluvias otoñales que fluctuaron entre 200-360mm. La DAU a lo largo del ciclo de crecimiento y desarrollo del cultivo mostró diferencias entre años. A la siembra (mayo) se registró la mayor disponibilidad hídrica, tanto en años húmedos como secos. A partir de la emergencia (junio), se observó un progresivo descenso de DAU debido al consumo del cultivo, en coincidencia con una estación que presenta escasas precipitaciones. La etapa de desarrollo de la espiga y grano fue el período de menor DAU. Los ciclos con mayor recarga otoñal presentaron a la siembra una DAU relativa =90%, mientras que durante ciclos más secos el valor fue del 70%. Las diferencias se ampliaron en espigazón/floración donde la DAU relativa descendió a valores cercanos al 50% y 20% en años húmedos y secos, respectivamente ($p < 0,05$). La menor disponibilidad hídrica incidió significativamente en el rendimiento, manifestando una merma promedio del 30% en años secos en comparación con años húmedos. No obstante, debido a la elevada capacidad de almacenar agua en el perfil de los suelos en estudio se logró una producción promedio de 3000 kg ha⁻¹, aún con escaso aporte de lluvias durante la estación de crecimiento del cultivo de trigo.

Palabras clave: Agricultura, Agua disponible, consumo, Perfil de humedad, Rendimiento de trigo

DIAGNÓSTICO DE RESERVAS DE ÁGUA ÚTEIS: UMA FERRAMENTA PARA A TOMADA DE DECISÕES E PROMOVER A RENTABILIDADE ECONÔMICA DA CULTURA DE TRIGO

RESUMO: O cultivo duplo Trigo/Milho é uma alternativa viável, pois contribui para o aumento da produção por meio do uso mais eficiente dos recursos. O trigo é cultivado em uma estação com poucas chuvas, portanto, em condições de sequeiro, o abastecimento de água depende em parte das reservas do solo. O objetivo do trabalho foi determinar o teor de água útil para a semeadura e durante o ciclo de crescimento da cultura do trigo em sequências com alto índice de intensificação. Seis locais com a sequência Trigo/Milho-Milho localizados na província de Santa Fé (Argentina) foram avaliados durante os ciclos 2012-2021. O monitoramento mensal do teor de água foi realizado em estratos de 20cm, até a profundidade de 120cm. A água útil disponível (DAU) e sua relação com a capacidade máxima de retenção foram calculadas por estrato. Foi realizada uma análise de variância e a separação das médias obtida pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Na semeadura, a DAU variou entre 145-260mm na profundidade de 120cm. O DAU relativo apresentou diferenças interanuais durante a implantação ($p < 0,05$). Os ciclos com menor DAU relativa coincidiram com menor recarga de chuva (< 200 mm); enquanto $DAU > 80\%$, corresponderam aos anos com chuvas de outono que variaram entre 200-360 mm. O DAU ao longo do ciclo de crescimento e desenvolvimento da cultura do trigo apresentou diferenças entre os diferentes anos. Na semeadura (maio) foi registrada a maior disponibilidade hídrica, tanto no ano úmido quanto no seco. A partir da emergência (junho), observou-se uma diminuição progressiva da DAU em função do consumo da cultura, coincidindo com uma estação que apresenta poucas chuvas. O estágio de desenvolvimento da espiga e do grão foi o período com menor DAU. Os ciclos com maior recarga outonal apresentaram DAU relativa = 90% na semeadura, enquanto nos ciclos mais secos o valor foi de 70%. As diferenças aumentaram na formação de espigas / floração onde o DAU relativo diminuiu para valores próximos a 50% e 20% nos anos úmidos e secos, respectivamente ($p < 0,05$). A menor disponibilidade de água teve um impacto significativo na produtividade, apresentando uma redução média de 30% nos anos secos em relação aos anos úmidos. Porém, devido à grande capacidade de armazenamento de água no perfil dos solos em estudo, foi alcançada uma produção média de 3000 kg ha⁻¹, mesmo com pouca entrada de chuva durante a época de cultivo do trigo.

Palavras chave: Agricultura, Água disponível, consumo, Perfil de umidade, Rendimento de trigo

INTRODUCCIÓN

El trigo es el cultivo de invierno más importante en la producción agropecuaria de la Región Pampeana, manifestando gran variabilidad en los rendimientos y en la calidad de sus granos como consecuencia de las condiciones de producción. La importancia de este cereal redonda en su rol como cultivo de servicio, comportándose como alternativa para integrar programas de rotaciones y como cobertura vegetal de invierno.

La superficie sembrada con trigo en la Argentina ha sufrido modificaciones vinculadas a aspectos

climáticos y socioeconómicos. No obstante, en el último quinquenio hubo un incremento, aunque con algunas fluctuaciones, pasando de 4,1 a 6,5 M hectáreas para los ciclos 2015/16 a 2020/21, respectivamente (BCR, 2021). La decisión de implantar este cultivo, depende entre otros factores, de los precios del cereal y la certeza de disponer de agua en el perfil del suelo como resultado de la recarga estivo/otoñal, puesto que el período de invierno suele presentar insuficiencia hídrica. El agua almacenada en los suelos depende de su capacidad de retención y del contenido de agua disponible. Factores como las precipitaciones, la condición físico-química del suelo en cuanto a la presencia de coloides, el estado estructural y la proporción de espacio poroso; como así también aspectos vinculados al manejo tales como cultivo antecesor, manejo del rastrojo, cobertura vegetal y tipo de labranza resultan ser determinantes en esta variable (Neugschwandner et al., 2014; FAO & GTIS, 2015; Schlegel et al., 2017).

La sustentabilidad para una sociedad significa la existencia de condiciones económicas, ecológicas, sociales y políticas, que permitan su funcionamiento en forma armónica en el tiempo y en el espacio. La actividad agrícola como sistema productivo debe tender a la sustentabilidad, en donde es fundamental cuidar y mejorar la relación de los factores participantes. Desde hace unos años, este concepto ha adquirido relevancia y se busca que los sistemas productivos sean sustentables, incrementado la proporción de cultivos por unidad de tiempo y superficie, con la finalidad de mejorar la eficiencia de los recursos involucrados (Harvey & Pilgrim, 2011; Alexandratos & Bruinsma, 2012). Es así que incorporar el doble cultivo, ya sea mediante las secuencias Trigo/Soja o Trigo/Maíz, son alternativas rentables debido a que permiten incrementar la producción de granos/ciclo agrícola, generando un mayor margen económico. Asimismo, intensificar la producción realizando dos cultivos al año, contribuye a un uso más eficiente de recursos disponibles tan importantes como el agua y la radiación solar (Monzon et al., 2014; Andrade et al., 2015).

La incorporación del rastrojo de trigo y el amplio desarrollo de su sistema radicular, generan un balance positivo de carbono en el suelo con el consecuente aporte de nutrientes, como así también una mejora en la capacidad de infiltración del agua de lluvia en el suelo, lo que contribuye a mejorar el funcionamiento y a mantener la calidad de los suelos (Kravchenko et al., 2015). Factores como la temperatura, las precipitaciones y la capacidad de almacenaje de agua en el suelo suelen ser importantes para el adecuado desarrollo del cultivo. La combinación de temperaturas inusualmente elevadas y el déficit hídrico pueden alterar la tasa de crecimiento, provocando pérdida de macollos con consecuencias directas sobre el rendimiento del cultivo (Villar, 2010; Steduto et al., 2012; Andrade et al., 2015).

Como aspecto muy importante a tener en cuenta al incorporar el doble cultivo con trigo, además de mantener el suelo cubierto y aportar residuos orgánicos, se pone en evidencia el consumo de excesos de agua. Este cultivo consume aproximadamente 500-600 milímetros de agua; por lo tanto, es factible mantener a mayor profundidad el nivel de los acuíferos freáticos, beneficio que se torna más importante en los años húmedos (Kirkegaard et al., 2007; Caviglia & Andrade, 2010; Novelli et al., 2010).

En consecuencia, para obtener un resultado exitoso es fundamental realizar una planificación en función de la cantidad de agua útil en el suelo y de la disponibilidad de nutrientes. Más allá de incrementar los rendimientos a través de programas de fertilización, resulta esencial diseñar estrategias adaptadas a cada ambiente para maximizar la captura de los recursos (radiación, agua y nutrientes), para lo cual es necesario conocer su disponibilidad y distribución temporal. El objetivo de la intensificación agrícola sustentable es incrementar la productividad de los sistemas agrícolas optimizando el uso de recursos e insumos, mantener la capacidad productiva de los suelos y evitar la expansión de la agricultura a ecosistemas frágiles (Cassman et al., 2003).

Un elevado rendimiento del cultivo de trigo, está directamente relacionado con el número de granos, componente que se define desde estadios tempranos del crecimiento del cultivo. Para lograr una eficiente formación de granos, es fundamental una adecuada disponibilidad de recursos como el agua y los nutrientes (Steduto et al., 2012). En sistemas de alta producción, con diagnósticos precisos de dotación de nutrientes en el suelo, se logra el suministro de nitrógeno, fósforo, azufre y algunos microelementos mediante decisiones oportunas e integradas a través de programas de fertilización. Por lo tanto, bajo condiciones de secano gran parte de la brecha de los rendimientos alcanzables con respecto a los potenciales, se basa en la oferta hídrica a partir de las reservas de agua de los suelos, generando pronósticos y expectativas en relación a la decisión de siembra (Angus & van Herwaarden, 2001; Schlegel et al., 2017).

La Región Triguera II Norte que abarca el Sur de la provincia de Santa Fe, Este de Córdoba y Norte de Buenos Aires, realiza un aporte importante en la producción de trigo. La fecha de siembra se extiende principalmente desde fines de mayo a mediados del mes de junio, ya que resulta coincidente con la fecha óptima de implantación de cultivares de ciclo largo a intermedio. En condiciones de secano y mediante el uso de tecnologías apropiadas, es posible incrementar la producción debido a la incorporación de los materiales de gran potencial de rendimiento, altos niveles de fertilización nitrógeno-fosfatada y adecuado control sanitario de los materiales genéticos. Tal cual se mencionó en párrafos anteriores, el trigo se desarrolla en

una estación con baja acumulación de precipitaciones, por tal motivo, el agua almacenada en la profundidad explorada por el sistema radical es el principal condicionante del rendimiento, puesto que requieren importantes cantidades para satisfacer la demanda de evapotranspiración a lo largo del ciclo del cultivo (Divito & García, 2017).

Estudios llevados a cabo sobre Argiudoles de la provincia de Santa Fe, han demostrado que una elevada disponibilidad de agua durante el período de encañazón es determinante en el rendimiento. Por lo tanto, el aporte de las precipitaciones durante esta etapa o la posibilidad de almacenar agua durante períodos previos se torna vital en la producción del cultivo. Mediante relaciones entre la capacidad de almacenar agua del suelo, el consumo durante la etapa crítica y el rendimiento obtenido, se determinó que por cada milímetro adicional almacenado en el perfil en los primeros 100-150 cm de profundidad al momento de la siembra, es factible incrementar el rendimiento en 19 kg de grano ha⁻¹ (Villar, 2010). Es así que la fuente principal de agua para los cultivos de secano implantados sobre suelos sin incidencia de acuíferos, radica en las precipitaciones y su posibilidad de almacenamiento en la zona de exploración de las raíces. La evaluación cuantitativa del agua en el suelo constituye entonces una herramienta fundamental para comprender las interacciones suelo-planta-atmósfera y establecer pautas de manejo que optimicen su uso en el sistema productivo (Landini et al., 2007; Qin et al., 2013).

Por lo tanto, a los fines de tener cierta independencia del aporte de agua pluviométrica, resulta vital que el suelo presente una elevada capacidad de almacenaje y reserva de agua para satisfacer los requerimientos del cultivo, puesto que explica más del 50% del rendimiento alcanzable a cosecha, llegando en algunas situaciones a valores entre 80 y 90% (Gvozdenovich & Paparotti, 2009; Villar, 2010; Del Campo et al., 2017).

El objetivo del presente trabajo consistió en determinar el contenido de agua del suelo a los fines de caracterizar el comportamiento del almacenaje de agua útil durante la implantación y el ciclo de crecimiento y desarrollo de cultivos de trigo establecidos en una secuencia agrícola con elevado índice de intensificación.

MATERIALES Y MÉTODOS

La experiencia se llevó a cabo en seis establecimientos agrícolas pertenecientes a las localidades de Fuentes, Sanford y Coronel Arnold, que se encuentran en el área de influencia de la Facultad de Ciencias Agrarias (UNR) ubicada al sur de la Provincia de Santa Fe (Argentina). Se evaluaron lotes con cultivos de trigo (*Triticum aestivum* L.) implantados en secuencias con elevado índice de intensificación: rotación Trigo/Maíz-Maíz. El índice de intensificación, que consiste en el número de cosechas por año en una determinada secuencia de cultivos, presentó un valor igual a 1,5 para todos los lotes evaluados. El período de estudio se extendió desde el ciclo agrícola 2012 al 2020, a los fines de percibir fluctuaciones vinculadas a cambios en el clima. Los suelos de los distintos sitios experimentales se clasifican como Argiudoles típicos y Argiudoles vérticos pertenecientes a las series de suelo Peyrano y Roldán, respectivamente. Son suelos profundos, con buen drenaje, sin limitantes a la producción, cuya clasificación por capacidad de uso según USDA corresponde a las clases I y II (Mapa Suelos – GEOINTA). Ambas series de suelo manifiestan elevada uniformidad en los factores de pedogénesis, como así también están sometidas a las mismas condiciones climáticas. La aplicación de fertilizantes nitrogenados y fosfatados se realizó según el uso actual medio de los productores. Asimismo, la protección y el manejo de los cultivos fueron los usuales para la zona.

En cada establecimiento se realizó una calicata de 1,5 metros de profundidad por un metro de lado, a los fines de describir el perfil del suelo identificando secuencia de horizontes, como así también los límites y espesor de cada uno (Figura 1A). Se estratificó en capas de 20 cm de espesor y se procedió a la obtención de muestras de suelo para evaluar los siguientes parámetros físicos:

- Densidad aparente por el método del cilindro según Blake & Hartge (1986). Se extrajeron muestras sin disturbar utilizando un cilindro de 47,5 mm de altura y 60 mm de diámetro (Figura 1B).
- Capacidad de Campo (CC) mediante el uso de la Olla de presión (Figura 1C), según Gardner (1986).
- Punto de marchitez permanente (PMP) por el método de la membrana de Richards (Figura 1C), descripto en Gardner (1986).



Figura 1: Calicata con la identificación de los horizontes (A); Extracción de cilindros mediante una prensa hidráulica o calador manual para densidad aparente de cada horizonte (B); Determinación en laboratorio de capacidad de retención y PMP (C).

- Agua útil: Se efectuó un seguimiento mensual de la evolución del contenido de agua en el suelo hasta la profundidad de 120 cm mediante el método gravimétrico (Gardner, 1986). Para tal objetivo se utilizó calador de profundidad de impacto y extractor manual, el cual permitió obtener las muestras por cada estrato (tres repeticiones), colocándolas en envases herméticos hasta su llegada al laboratorio (Figura 2). Empleando los valores de densidad aparente, se calculó la capacidad de almacenaje de agua útil en el perfil efectivo, expresada como lámina de agua (mm). Asimismo, se calculó el déficit de agua, como la cantidad necesaria para llegar a la máxima cantidad de agua útil posible de retener en cada estrato de suelo.



Figura 2: Seguimiento del contenido de humedad: Obtención de muestras por capas de suelo hasta los 120 cm de profundidad.

Se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) y la separación de medias se obtuvo mediante el test de Tukey (nivel de significancia del 5%), utilizando el software estadístico Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2015). Asimismo, se utilizó la metodología de estudio de caso que permite investigar un fenómeno contemporáneo dentro de un contexto real, usando múltiples fuentes de evidencia. Tal como señala Yin (1994) esto permite observar resultados reales, identificar aspectos positivos y negativos de las estrategias adoptadas, y a la vez tomar parte activa en el análisis para determinar alternativas o cursos de acción.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los establecimientos relevados manifestaron diferentes contenidos de agua al momento de la implantación del cultivo de trigo. La Figura 3 muestra el contenido del agua útil disponible (DAU) que se cuantificó a la siembra en los 120 cm de profundidad, en cada uno de los ciclos agrícolas evaluados. Los

suelos captaron y almacenaron durante el período de barbecho diferentes cantidades de agua que fluctuaron entre 145 y 260 milímetros, según el ciclo estudiado. Esta diferencia, sumada a la cantidad de agua proveniente de las precipitaciones que se presentaron durante el ciclo de desarrollo del cultivo de trigo, tendrá incidencia sobre el rendimiento.

La evaluación del contenido de agua útil durante el mes de mayo permitió caracterizar el almacenaje de humedad edáfica al momento del inicio de las labores de implantación del cultivo de trigo en la zona en estudio. El cultivo de maíz de primera fecha de siembra fue el antecesor del trigo en la rotación altamente intensificada Trigo/Maíz-Maíz, el cual se encontraba en el estado de madurez fisiológica; y por lo tanto había dejado de consumir agua hacia fines del mes de febrero. La recarga aportada por las lluvias otoñales resultó ser el factor que tuvo mayor incidencia sobre el perfil de humedad en la secuencia evaluada.

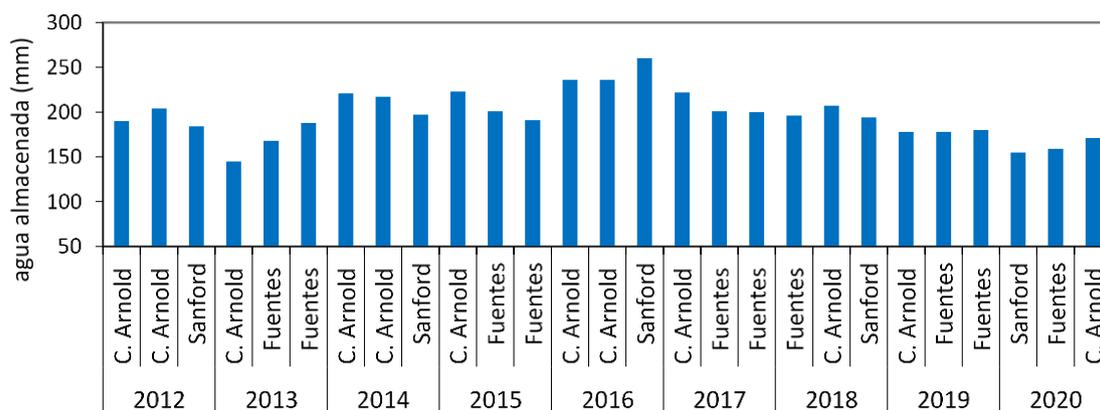


Figura 3: Análisis retrospectivo del contenido de agua del suelo (lámina de agua en mm) al momento de implantación del cultivo de trigo en cada sitio experimental, durante los nueve ciclos agrícolas estudiados (2012 al 2020).

Numerosos estudios han demostrado que el mayor contenido hídrico a la siembra da como resultado un mayor consumo de agua por parte del cultivo, con un impacto positivo sobre el rendimiento debido a que la relación entre ambas variables es lineal y directa (Musick *et al.*, 1994; Qin *et al.*, 2013; Liang *et al.*, 2019). Propiedades del suelo como el stock de carbono, la porosidad total y la distribución del tamaño de poros, influyen entre otras, sobre la calidad del suelo. Aquellos sistemas que ofrezcan mejores atributos físicos y químicos, permitirán un mayor almacenamiento y posterior aprovechamiento del agua con beneficios sobre la calidad edáfica y la conversión del agua en grano (Dam *et al.*, 2005; Neugschwandner *et al.*, 2014).

El rendimiento del cultivo de trigo puede considerarse el producto de tres componentes: la cantidad de espigas por unidad de área, la cantidad de granos por espigas y el tamaño de los granos. Los componentes se desarrollan en forma secuencial y el momento en que ocurra el estrés hídrico determina cuál de los componentes se verá afectado. Por lo tanto, en términos generales, el estrés temprano limita la cantidad de macollos (espigas por unidad de área) y el estrés después de la antesis reduce la cantidad y el tamaño de los granos. Surge entonces, la importancia de mantener un equilibrio en términos de oferta adecuada de agua durante el ciclo de crecimiento del cultivo, antes y después de la antesis a los fines de no resentir su rendimiento (Steduto *et al.*, 2012). Por lo tanto, el agua almacenada en el perfil del suelo es considerada de gran valor para el rendimiento del trigo debido a que será el agua disponible en la etapa de desarrollo de macollos, como así también durante el llenado del grano. Ante situaciones de estrés hídrico, el cultivo aprovechará el agua ofrecida por la reserva edáfica. El incremento en el rendimiento puede oscilar entre 30-60 kg de grano ha^{-1} por cada milímetro de agua de reserva en profundidad. Estos valores de conversión en grano dependen de la intensidad del estrés hídrico y de la etapa del cultivo, siendo mayor la respuesta cuando el estrés se presenta después de la etapa de antesis (Kirkegaard *et al.*, 2007).

Una forma práctica de expresar el agua disponible (DAU) es hacerlo en términos relativos con respecto al agua útil total o agua útil máxima. Permite visualizar, dentro de los límites de disponibilidad de agua de un suelo, el grado o facilidad de aprovechamiento por parte del cultivo; y por lo tanto contribuye a hacer diagnósticos certeros y a la toma de decisiones. Si el porcentaje de DAU está por debajo de un determinado umbral (<45-50%), la tasa de evapotranspiración del cultivo puede disminuir afectando la

fotosíntesis. El suelo debería ofrecer una cantidad mínima de agua denominada nivel de agotamiento permisible, de modo tal que la producción pueda ser la máxima posible. Valores de humedad edáfica inferiores al nivel mínimo comienzan a resentir el crecimiento y desarrollo de los vegetales, en detrimento de la productividad (Panda *et al.*, 2003).

Los resultados obtenidos muestran que la variación del almacenaje expresada como porcentaje del máximo contenido de agua útil hasta los 120 cm de espesor al momento de la siembra, presentó diferencias estadísticamente significativas interanuales durante el período analizado ($p < 0,05$), registrando los menores valores aquellos años que recibieron menor aporte de agua de lluvia durante el período de recarga otoñal en los meses de marzo, abril y mayo (Figura 4).

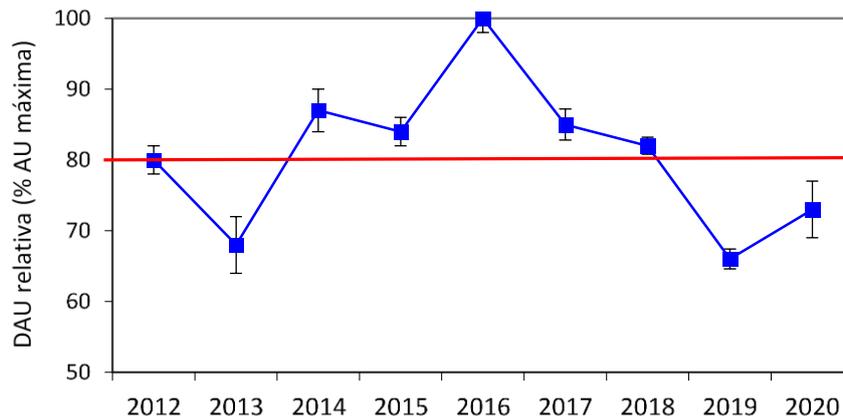


Figura 4: Agua útil disponible al momento de la siembra, expresada como porcentaje del contenido máximo hasta los 120 cm de espesor. Cada punto representa la media entre sitios por ciclo agrícola. Las barras verticales indican el error estándar de la media.

La disponibilidad de agua útil al momento de la implantación del cultivo presentó durante el período analizado, tres ciclos con registros inferiores al 73% respecto al máximo valor alcanzable de reserva de agua aprovechable por el cultivo, siendo coincidentes con menores recargas del perfil del suelo a través de las precipitaciones (años 2013, 2019 y 2020). Los ciclos restantes presentaron valores de reserva de agua aprovechable por el cultivo superiores al 80% de la máxima capacidad de almacenaje, correspondiendo a los años que presentaron lluvias otoñales que fluctuaron entre 200 y 360 mm (Figuras 4 y 5).

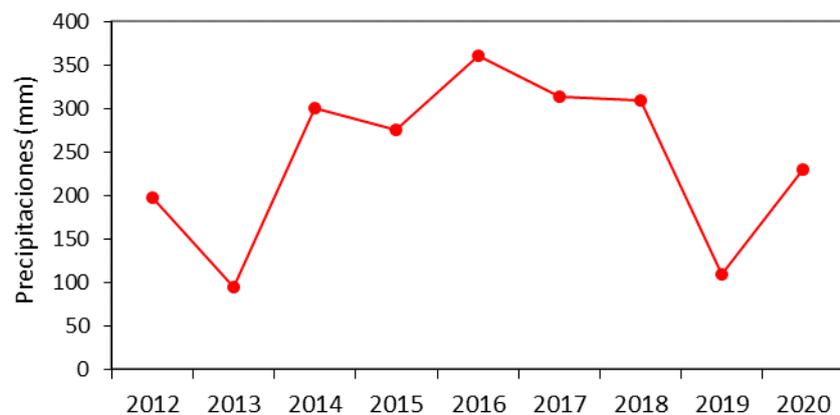


Figura 5: Precipitaciones (mm) registradas durante el período comprendido entre los meses de marzo, abril y mayo en cada ciclo evaluado.

La capacidad de captación y retención del agua de lluvia es elevada en suelos como los evaluados en este estudio (Argiudoles). Esto se debe a que son suelos profundos y presentan una elevada capacidad de almacenaje otorgada por sus rasgos morfológicos, características texturales y su elevado contenido de materia orgánica, logrando una reserva máxima de agua aprovechable por los cultivos superior a los 200 mm en los primeros 120 cm de espesor.

Con la finalidad de cuantificar la disponibilidad de agua útil a lo largo del ciclo de crecimiento y desarrollo del cultivo de trigo, se evaluó el contenido de agua y la variación del almacenaje en el suelo hasta la profundidad de 120 cm. Los momentos de muestreo se establecieron considerando las siguientes etapas del cultivo y estadios fenológicos de desarrollo: Barbecho (abril/mayo); Siembra/Emergencia (junio); Macollaje (julio/agosto); Encañazón (setiembre); Espigazón/Floración (octubre); Llenado de grano (noviembre) y Cosecha (principios de diciembre). Para un mejor análisis, únicamente se consideraron tres ciclos agrícolas con elevada disponibilidad hídrica (2015/16/17) y tres períodos con menor aporte de agua pluviométrica (2018/19/20) (Figura 6).

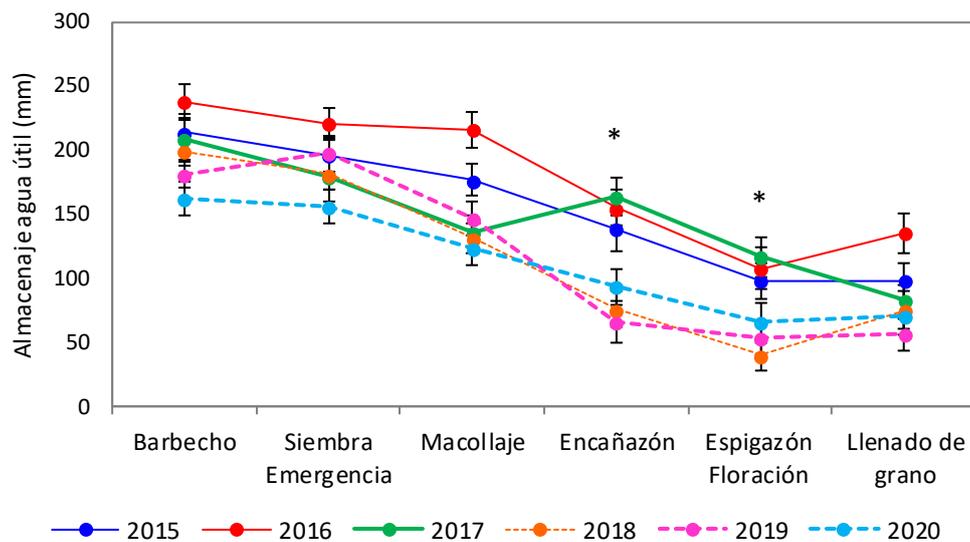


Figura 6: Variación del almacenaje de agua útil hasta los 120 cm de espesor (lámina de agua mm) en diferentes etapas del cultivo de trigo, durante los ciclos 2015 al 2020. Cada punto representa la media entre sitios por ciclo agrícola. Las barras verticales indican el error estándar de la media. (*) Indica diferencias estadísticamente significativas entre años secos y años húmedos.

Hacia fines del mes de mayo se inició la siembra del cultivo de trigo, con los cultivares de mayor duración en su ciclo de crecimiento. Este mes resultó ser el de mayor disponibilidad hídrica edáfica a lo largo de toda la estación de crecimiento del cultivo, tanto en años húmedos como en aquellos que presentan mayor restricción en el aporte de agua. Desde el mes de junio en adelante (a partir de la emergencia), se observó un progresivo descenso del contenido de agua aprovechable por el cultivo, como consecuencia del incremento del consumo hídrico por evapotranspiración, conforme avanza el crecimiento y desarrollo del trigo en una estación con escaso aporte de agua de lluvia. El mes de octubre se presentó como el período de menor disponibilidad de agua útil, debido al elevado consumo hídrico durante el desarrollo de la espiga y grano, así como al incremento de las temperaturas primaverales y los escasos aportes de agua de lluvia durante el invierno. Diversos estudios han cuantificado los requerimientos de agua en las diferentes etapas del cultivo. Al comienzo del período de crecimiento, el uso diario de agua resulta ser muy bajo (< 2 mm), determinando también una baja transpiración debido a la escasa cobertura vegetal. A partir de la etapa de macollaje, la tasa de uso de agua se incrementa paulatinamente, alcanzando un consumo aproximado de 3-4 mm diarios durante el período de encañazón. Las necesidades máximas de agua ocurren durante la etapa de llenado de granos en la cual es fundamental disponer entre 5-8 mm por día para un resultado satisfactorio (Steduto *et al.*, 2012; Divito & García, 2017). La menor DAU registrada en las etapas de encañazón/espigazón, resultó coincidente con el incremento en cantidad y frecuencia de las precipitaciones ocurridas en septiembre/octubre que es utilizada por el cultivo, sin suponer un incremento de la reserva hídrica del perfil. Durante el mes de noviembre, coincidente con la etapa de finalización del llenado de grano y senescencia del cultivo, el

mayor aporte de agua de lluvia y la disminución del consumo hídrico por el cultivo, permitió incrementar las reservas de agua disponible en el perfil de suelo (Figura 6).

Durante los ciclos húmedos de las campañas 2015 a 2017 se registró un significativo aporte de lluvias durante el período de recarga otoñal (promedio de los tres ciclos = 310mm). Es así que al momento del inicio del cultivo (fines de mayo- principios de junio), la disponibilidad de agua útil presentó un valor promedio del 90% respecto del máximo valor alcanzable de reserva de agua aprovechable por el cultivo. Posteriormente, durante el mes de octubre y coincidiendo con el menor registro de agua útil durante todo el ciclo del cultivo, se determinó que el perfil del suelo aún presentaba la mitad del máximo almacenaje alcanzable, durante las campañas 2015/16/17. Por el contrario, durante los ciclos secos (2018 al 2020), en los cuales hubo menor aporte de lluvias durante el período de recarga otoñal (promedio de los tres ciclos = 210mm), la reserva de agua fue diferente. Al momento del inicio del cultivo (mayo-junio), la DAU presentó valores del 70 % respecto de la máxima capacidad de almacenaje, alcanzando durante la etapa de espigazón y floración solo el 20 % con respecto al agua útil máxima o total. Los resultados ponen de manifiesto que tanto la recarga durante el barbecho, como el aporte de precipitaciones a lo largo del ciclo del cultivo, determinaron una oferta diferente de agua aprovechable para las plantas en los años húmedos y aquellos con déficit hídrico, siendo las diferencias estadísticamente significativas (Figura 7).

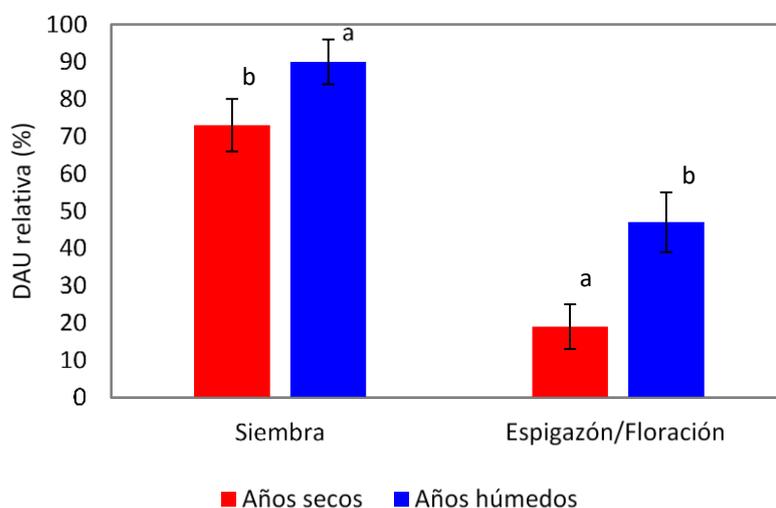


Figura 7: DAU relativa en los meses de mayo/junio (Siembra/Emergencia) y octubre (Espigazón/Floración). Cada punto representa la media entre ciclos húmedos (2015-16-17) y ciclos secos (2018-19-20). Las barras verticales indican el error estándar de la media. Letras distintas señalan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

La reserva de agua en el suelo está contenida en el espacio poroso, por lo tanto, la cantidad máxima de agua que un suelo puede almacenar está directamente relacionada con esta variable. Solamente una parte del agua contenida en los capilares es la fracción utilizable por las plantas, con lo cual se constituye en la reserva hídrica edáfica. Asimismo, el agua en la matriz del suelo está retenida con diferentes niveles de energía, a menor contenido de humedad y menor tamaño de los poros, más fuertes son las fuerzas de retención. La mayor o menor energía con que el agua está retenida en el suelo determina la disponibilidad de para los vegetales, por lo tanto, deben superar esas fuerzas que mantienen el agua en los capilares del suelo. Si el agua está muy fuertemente retenida, no puede ser absorbida por las raíces, por lo que su aprovechamiento resulta más dificultoso y consecuentemente baja la producción del cultivo (Hillel, 1991).

En nuestro estudio, el almacenamiento de agua del suelo a la siembra y en la etapa de espigazón/floración fue diferente en función de las recargas de otoño y las precipitaciones ocurridas durante el invierno y el inicio de la primavera, respectivamente. La elevada capacidad de almacenaje de agua que expresaron los suelos fue de gran importancia en las primeras etapas del cultivo, característica vinculada a la condición física y química, como así también el desarrollo del perfil. No obstante, en los ciclos donde las precipitaciones fueron insuficientes, la capacidad de almacenamiento del suelo no alcanzó el valor mínimo necesario en la etapa de espigazón/floración, de modo tal que se pueda asegurar un rendimiento elevado (Figura 7). Tal cual se mencionó en párrafos anteriores, se requiere al menos un 45-50% de

reserva de DAU con respecto al valor máximo, a los fines de no resentir el crecimiento y rendimiento de los cultivos (Panda *et al.*, 2003). El aporte de lluvias durante el ciclo de desarrollo del cultivo fue diferente en años secos y húmedos. Se puede observar en la Figura 8 que el acumulado de las lluvias desde junio a octubre fue significativamente menor en los años secos en comparación con los años de mayor aporte pluviométrico.

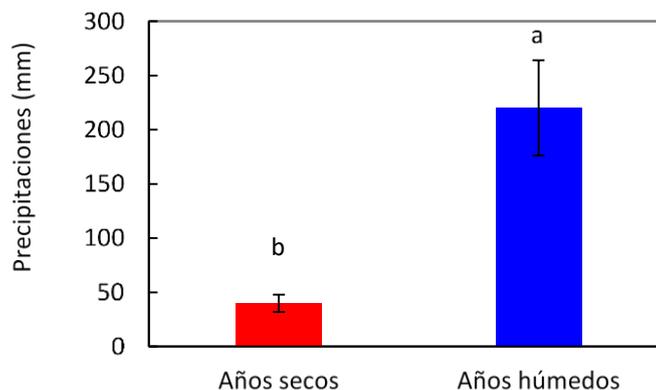


Figura 8: Promedio de las precipitaciones ocurridas desde junio a octubre para los ciclos secos y húmedos. Las barras verticales indican el error estándar de la media. Letras distintas señalan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

Es así que la menor disponibilidad hídrica debida a las escasas precipitaciones a partir de la siembra del cultivo hasta el momento de mayor demanda se constituyó en un factor que incidió significativamente en el rendimiento de los cultivos. En años secos, con aportes de lluvias inferiores a la media se cuantificaron mermas en el rendimiento de hasta un 30% (Figura 9).

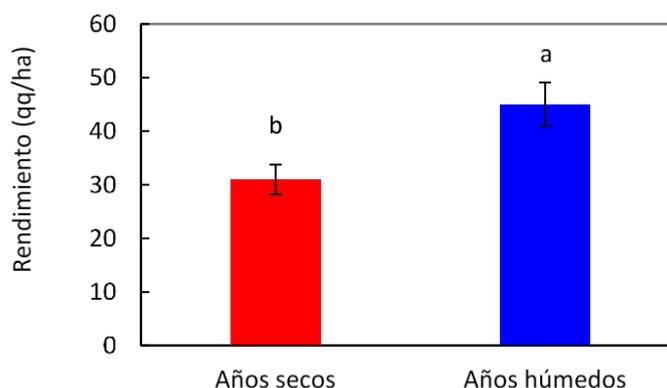


Figura 9: Rendimiento promedio del cultivo de trigo en los ciclos secos y húmedos. Las barras verticales indican el error estándar de la media. Letras distintas señalan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que una elevada capacidad de almacenaje de agua en el perfil del suelo como resultado de la recarga otoñal, asegura la disponibilidad de este recurso en los períodos de mayor demanda. Esta mayor oferta permitió aumentar el consumo de agua durante las etapas de anthesis y madurez, siendo complementada con los aportes pluviométricos que ocurrieron durante el ciclo de desarrollo del cultivo. Este aporte de agua de reserva debido a la elevada capacidad de almacenaje se torna más evidente en años con menores precipitaciones.

Consideraciones finales

Una contribución a la sustentabilidad de los sistemas de la Región Pampeana podría estar basada en reducir la proporción de las tierras que se destinan a la siembra continua de soja, cultivo que produce poco volumen de rastrojos y raíces, con una velocidad elevada de descomposición. Asimismo, se debería incrementar la proporción de gramíneas para mejorar el stock de carbono y la condición física de los suelos. Mediante la intensificación de la agricultura, realizando más de un cultivo al año e incorporando gramíneas se propician las condiciones para una mayor captura de carbono, radiación y agua. Reducir el período de barbecho, mantener la cobertura del suelo y mejorar la infiltración del agua, redundan en una mayor eficiencia en el uso de los recursos y en un balance económico favorable. La condición físico-químicas y morfológica de los suelos estudiados permitió almacenar cantidades importantes de agua durante la recarga otoñal (pre-siembra), aún con fluctuaciones en función de ciclos húmedos o secos. La capacidad de almacenar agua en el perfil del suelo se vuelve más importante en años de escaso aporte de agua durante la estación de crecimiento del cultivo de trigo, logrando en el área en estudio una producción de grano promedio que alcanzó los 30 quintales ha^{-1} . El complemento de agua pluviométrica durante la etapa de crecimiento del cultivo en los años con mayor aporte de lluvias, permitió incrementar los rendimientos (> 45 qq ha^{-1}). Por otro lado, en presencia de ciclos húmedos con lluvias intensas y valores acumulados por encima de lo normal, como son los eventos interanuales El Niño, se aprovechan los excesos de agua, evitando anegamiento y pérdida de la calidad del suelo en algunas zonas.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación fue realizado en el marco de Convenios de Servicios No Estandarizados establecidos entre la Cátedra de Edafología – Facultad de Ciencias Agrarias (Universidad Nacional de Rosario) y la empresa Alfagro S.A., iniciado en el año 2011. Los autores agradecen a la empresa tanto el apoyo financiero, como el suministro de los sitios experimentales.

REFERENCIAS

- ALEXANDRATOS N. & J. BRUINSMA. (2012). World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working paper No. 12-03. Rome, FAO.
- ANDRADE J.F., S.L. POGGIO, M. ERMÁCORA & E.H. SATORRE. (2015). Productivity and resource use in intensified cropping systems in the Rolling Pampa, Argentina. *European Journal of Agronomy* 67: 37-51.
- ANGUS J.F. & A.F. VAN HERWAARDEN. (2001). Increasing Water Use and Water Use Efficiency in Dryland Wheat. *Agronomy Journal*, 93: 290-298.
- BCR. (2021). Estimaciones País. <https://www.bolsadecereales.com/estimaciones-informes>
- CASSMAN K.G., A. DOBERMANN, D.T. WALTERS & H. YANG. (2003). Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annual Review of Environment and Resources*. 28: 315–358.
- BLAKE G.R. & K.H. HARTGE. (1986). Bulk Density: In: Klute, A. (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 1* (2nd ed.). Pp. 363-375. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- CAVIGLIA O. & F.H. ANDRADE. (2010). Sustainable Intensification of Agriculture in the Argentinean Pampas: Capture and Use Efficiency of Environmental Resources. *Americas Journal of Plant Science and Biotechnology* 3: 1-8.
- DAM R.F., B.B. MEHDI, M.S.E. BURGESS, C.A. MADRAMOOTOO, G.R. MEHUYS & I.R. CALLUM. (2005). Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada. *Soil & Tillage Research*, 84: 41-53.
- DEL CAMPO N., M. SERRA, A.E. QUIRIBAN, M. CASTAÑO, M.A. FERNÁNDEZ & M.C. PEREYRA CARDOZO. (2017). Rendimiento y composición proteica del grano de trigo (*Triticum aestivum* L.) en respuesta a condiciones contrastantes de disponibilidad de agua y nitrógeno en inicio de floración. *Semiárida: Rev. Fac. Agron. UNLPamp*, 27:37-50.
- DI RIENZO J.A., F. CASANOVES, M.G. BALZARINI, L. GONZALEZ, M. TABLADA & C.W. ROBLEDO. (2015). InfoStat versión 2015. Grupo Infostat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>.
- FAO & GTIS. (2015). Estado Mundial del Recurso Suelo (EMRS) – Resumen Técnico. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura y Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo, www.fao.org/3/a-i5126s.pdf.
- DIVITO G. & F.O. GARCÍA. (2017). Manual del Cultivo de Trigo. Comp. y editores: Divito, G; García F.O. International Plant Nutrition Institute, pp 224.
- GARDNER W.H. (1986). Water content. In Klute, A. (Ed.). *Methods of soil analysis, Part 1*. 2nd ed., American Society of Agronomy, Madison, Agronomy 9: 493-544.
- GEOINTA: <http://www.geointa.inta.gov.ar/2014/05/22/mapa-de-suelos-de-la-provincia-de-santa-fe>. Última visita: 11/07/21
- GVOZDENOVICH J. & O. PAPANOTTI. (2009). Relación entre el agua edáfica a la siembra y el rendimiento del cultivo de Trigo en diferentes departamentos de la provincia de Entre Ríos. *Publicación Técnica INTA Paraná*.
- HARVEY, M. & S. PILGRIM. (2011). The new competition for land: food, energy, and climate change. *Food Policy* 36: S40–S51.
- HILLEL D. (1991). *Introduction to Soil Physics*. Academic Press Inc. EEUU. 364p.

- KIRKEGAAR J.A., J.M. LILLEY, J.N. HOWE & J.M. GRAHAM. (2007). Impact of subsoil water use on wheat yield. *Australian Journal of Agricultural Research* 58: 303-315.
- KRAVCHENKO A.N., W.C. NEGASSA, A.K. GUBER & M.L. RIVERS. (2015). Protection of soil carbon within macro-aggregates depends on intra-aggregate pore characteristics. *Sci. Rep.* doi:10.1038/srep16261.
- LANDINI A.M., D. MARTINEZ, H. DÍAS, E. SOZA, D. AGNES & C. SAINATO. (2007). Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos con distinta textura. *Ciencia del Suelo*, 25: 123-131.
- LIANG Y.F., S. KHAN, A. REN, W. LIN, S. ANWAR, M. SUN & Z. GAO. (2019). Subsoiling and sowing time influence soil water content, nitrogen translocation and yield of dryland winter wheat. *Agronomy Journal* 9:37.
- MONZON J., J. MERCAU, J. ANDRADE, O. CAVIGLIA, A. CERRUDO, A. CIRILO, C. VEGA, F.H. ANDRADE & P. CALVIÑO. (2014). Maize – soybean intensification alternatives for the Pampas. *Field Crops Research* 162: 48–59.
- MUSICK J.T., O.R. JONES, B.A. STEWART & D.A. DUSEK. (1994). Water-yield relationships for irrigated and dryland wheat in the U.S. Southern Plains. *Agronomy Journal* 86:980-986
- NOVELLI L., O. CAVIGLIA, M. WILSON, C. SASAL & E. GABBIOUD. (2010). Efecto de la inclusión frecuente de soja sobre el almacenamiento de carbono y la estabilidad estructural en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos. *Actualización Técnica AGRICULTURA SUSTENTABLE 2010. Serie Extensión n° 58*, pp 7-12.
- NEUGSCHWANDTNER R.W., P. LIEBHARD, H.P. KAUL & H. WAGENTRISTL. (2014). Soil chemical properties as affected by tillage and crop rotation in a long-term field experiment. *Plant, Soil and Environment* 60:57-62.
- PANDA R.K., S.K. BEHERA & P.S. KASHYAP. (2003). Effective management of irrigation water for wheat under stressed conditions. *Agricultural Water Management* 63(1):37-56.
- QIN W., B. CHI & O. OENEMA. (2013). Long-term monitoring of rainfed wheat yield and soil water at the loess plateau reveals low water use efficiency. *PLOS ONE* 8(11):e78828
- SCHLEGEL A.J., Y. ASSEFA, L.A. HAAG, C.R. THOMPSON, J.D. HOLMAN & L.R. STONE. (2017). Yield and soil water in three dryland wheat and grain sorghum rotations. *Agronomy Journal* 109:227-238.
- STEDUTO P., T.C. HSIAO, E. FERERES & D. RAES. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. *Div. de Tierras y Aguas. Estudio FAO: Riego y Drenaje (FAO) spa no. 66*. pp 510
- VILLAR J. (2010). Estimación de rendimientos de trigo a partir del agua almacenada en el centro de Santa Fe. *Revista Para Mejorar la Producción. INTA Oliveros*, 43: 33-41.
- YIN, R.K. (1994). *Case Study Research – Design and Methods, Applied Social Research Methods (Vol. 5, 2nd ed.)*, Newbury Park, CA, Sage.

Received on 08, 2021.

Accepted on 08, 2021.