



Universidad Nacional del Nordeste
Facultad de Ciencias Agrarias

Trabajo Final de Graduación
Modalidad: Tesina

**Disponibilidad de agua en el período crítico del cultivo de
trigo (*Triticum aestivum* L.) bajo distintos niveles de
fertilización nitrogenada**

Alumno: KUCZEK, Lucio

Director: Ing. Agr. (Dr.) NEIFF, Nicolás

Tribunal Evaluador:

- Ing. Agr. (Dra.) FERNÁNDEZ LÓPEZ, Carolina
- Ing. Agr. (Dr.) KURTZ, Ditmar
- Ing. Agr. (Mgter.) SLUKWA, Mario

Lugar de trabajo: San Bernardo, Chaco

2021

Índice:

RESUMEN.....	3
INTRODUCCIÓN.....	4
OBJETIVO GENERAL.....	7
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
VARIABLES MEDIDAS.....	8
EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	8
ÍNDICE DE VEGETACIÓN DIFERENCIAL NORMALIZADO.....	9
INTERCEPCIÓN DE RADIACIÓN.....	9
PRODUCCIÓN DE BIOMASA AÉREA EN EL PERÍODO CRÍTICO Y PARTICIÓN A ESPIGA.....	9
PARTICIÓN A MADUREZ, RENDIMIENTO EN GRANO Y EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA.....	10
ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	10
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	11
CONCLUSIONES.....	19
BIBLIOGRAFÍA.....	20

Resumen

La disponibilidad hídrica al momento de la siembra es una de las principales variables para definir la siembra del trigo. A lo largo del ciclo del cultivo, la baja disponibilidad de agua, como así también de nitrógeno (N), a menudo no permiten expresar su potencial de rendimiento, especialmente si estas limitantes se dan durante el período crítico (PC) del cultivo para la fijación del número de granos. En el presente trabajo se evaluó el rendimiento en grano (RG) y variables asociadas bajo distintas dosis de nitrógeno correspondientes a 0, 50 y 100 kg N ha⁻¹ (N0, N50 y N100, respectivamente) ante aportes de agua de: (i) 50 mm a la siembra del cultivo (50S), (ii) la combinación de 50 mm a la siembra y 45 mm al inicio del período crítico (50S+45IPC) y un tratamiento control sin aporte artificial de agua (T). El ensayo se realizó en la localidad de San Bernardo, Provincia del Chaco, utilizando un diseño de parcelas divididas con tres repeticiones. En cada parcela principal (aporte hídrico) fue sembrada la variedad Klein Nutria, a un distanciamiento de 0,26 m entre líneas. A nivel de subparcelas (8 surcos, 4,08 m²) se realizó el aporte de nitrógeno (N) mediante la fertilización con urea a la siembra. La evapotranspiración (EvT) en el periodo siembra-cosecha se estimó a partir de la extracción de muestras de suelo hasta 1,4 m del perfil. Además, se realizaron mediciones del índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) y de radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi) por el cultivo. La biomasa aérea se cuantificó como la materia seca producida al inicio y al final del período crítico (MS_{IPC} y MS_{FPC}, respectivamente) y a cosecha (MStot), como así también la partición a espiga al final del período crítico (Fr Esp) y a cosecha (IC). Además, se estimó el número de espigas por metro cuadrado (Esp m⁻²) y se calculó la eficiencia en el uso del agua (EUA). Los tratamientos de aporte de agua y N tuvieron una respuesta significativa ($p < 0,05$) sobre la gran parte de las variables medidas (RG, Esp m⁻², EUA, EvT, MStot). El RG del tratamiento con la mayor dosis de N y aporte hídrico (100N y 50S+45IPC, respectivamente) fue de 3.929 kg ha⁻¹, superando en 1.368 kg ha⁻¹ al tratamiento control sin aporte de agua y nitrógeno. Esto se atribuyó principalmente a incrementos en Esp m⁻² (+136) y aumentos en EUA y EvT. La fertilización nitrogenada incrementó la RFAi (17,28 y 26,53% para 50N y 100N respecto a 0N) asociado con mayores niveles de NDVI, reflejando incrementos en la producción de biomasa al inicio (MS_{IPC}; 26,06 y 57,29 g m⁻² para 50N y 100N respecto a 0N) y final del periodo crítico (MS_{FPC}; 78,99 y 118,49 g m⁻²).

Introducción:

El estrés por causas abióticas (*e.g.*, agua o nutrientes) es el principal factor limitante del crecimiento de las plantas y pronto se volverá más severo. De cara a la escasez global de recursos de agua, la sequía puede afectar países enteros durante muchos años, lo que resulta en costos serios tanto sociales, como económicos y ambientales (Parry *et al.*, 2005). Comprender cómo interactúan los diversos factores climáticos y cómo afectan a la producción de alimentos es esencial a la hora de tomar decisiones sobre cómo adaptarse a los efectos del cambio climático (Asseng *et al.*, 2015).

La baja disponibilidad de agua es una de las mayores causas de la reducción de los rendimientos, afectando a la mayoría de las regiones cultivadas alrededor del mundo (Bruce *et al.*, 2002) y, junto con la baja disponibilidad de nitrógeno, frecuentemente limitan el crecimiento y la productividad de la mayoría de los cultivos incluyendo a los cereales, y por lo tanto al trigo (Sinclair & Jamieson, 2006; Barnabás *et al.*, 2008).

En Argentina, el cultivo de trigo transitó escenarios adversos entre los años 2007-2016 (dificultades comerciales, precios bajos, entre otras causas) que condujeron a que la superficie cultivada se mantuviera por debajo del promedio histórico (5,5 millones de hectáreas) hasta la campaña 2016/17 (Manual de Trigo, 2017; Food and Agriculture Organization [FAO], 2020; Trigo Argentino, 2020).

Las irregularidades de las lluvias registradas año a año, provocan incertidumbre en el comienzo de cada campaña respecto a la posible producción a obtener e impacta en la planificación de las empresas agropecuarias (Fontanetto *et al.*, 2009). En este sentido, la acumulación de materia seca como así también la partición de asimilados depende en gran parte de la condición hídrica y nutricional por la que transcurre el cultivo de trigo a lo largo de su ciclo.

Una adecuada producción de asimilados en la fase vegetativa y la acumulación de éstos en el tallo tienen un papel decisivo en la formación de los órganos reproductivos, pudiendo afectar directamente el rendimiento final (Blum *et al.*, 1994). No obstante, existe un amplio consenso de que la etapa de crecimiento reproductivo es la más sensible al déficit hídrico. Es así que dentro de la etapa encañazón-espigazón-antesis se encuentra el período crítico para la determinación del rendimiento en trigo, ya que se está determinando el principal componente del rendimiento, el número de granos por unidad de área, como así también el peso potencial de estos granos (Miralles *et al.*, 2014).

El estrés por déficit hídrico en la etapa reproductiva es uno de los problemas más frecuentes en la producción agrícola (Blum, 2009). Lo expresado anteriormente se ve magnificado en sistemas de producción de trigo en el sudoeste chaqueño, ya que el cultivo no recibe lluvias considerables hasta la

floración o inicios de llenado de grano. El período crítico del cultivo de trigo se ubica, dependiendo de las condiciones ambientales, desde aproximadamente tres semanas previas hasta una semana posterior a la floración del trigo (Fischer, 1985).

Haciendo un análisis zonal, en la región del Sudoeste chaqueño llueven en promedio 103 mm (período 1988-2017) durante los meses donde se cultiva trigo de ciclo corto (Figura 1). Sin embargo, la disponibilidad de agua para el cultivo presenta una gran variabilidad previo y a lo largo del ciclo. Además, las lluvias de octubre (mediados y fines del llenado de granos) realizan escasos aportes en la generación del rendimiento. A partir de un análisis de frecuencias acumuladas para esta región, se puede establecer que, durante el período crítico del cultivo, uno de cada dos años se registran precipitaciones que rondan los 45 mm de agua caída en dicho periodo (Figura 2). Sin embargo, el potencial de rendimiento del cultivo fue establecido previamente (Aramburu Merlos et al., 2015), siendo menester explorar las limitaciones por agua durante el periodo crítico y cuáles serían los impactos sobre el rendimiento en grano.

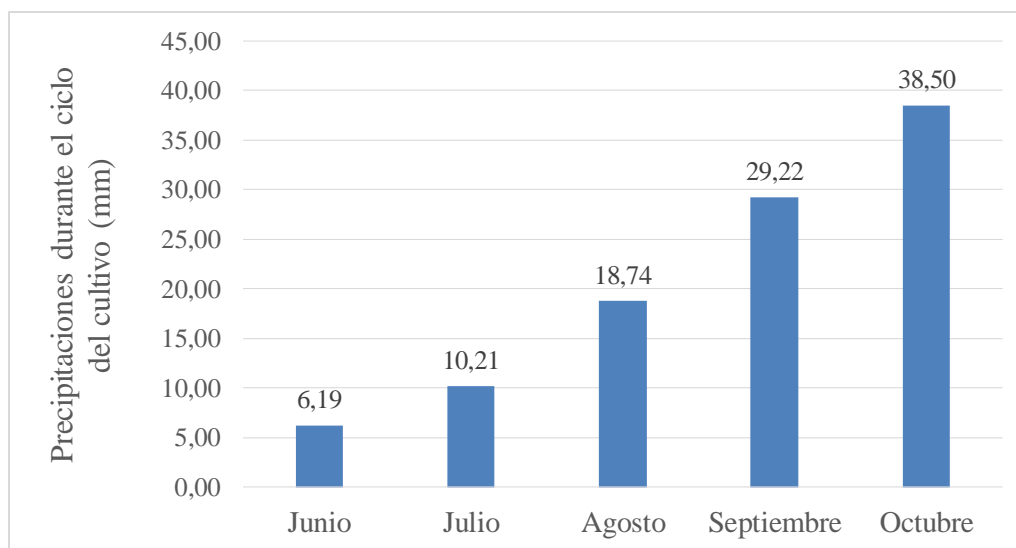


Figura 1. Promedio de precipitaciones (mm) de la zona, para los años 1988-2017, en los meses correspondientes al ciclo del cultivo. Datos obtenidos de la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Las Breñas. Fechas de emergencia y cosecha empleadas para el cálculo: 18 de Junio y 19 de Octubre, respectivamente.

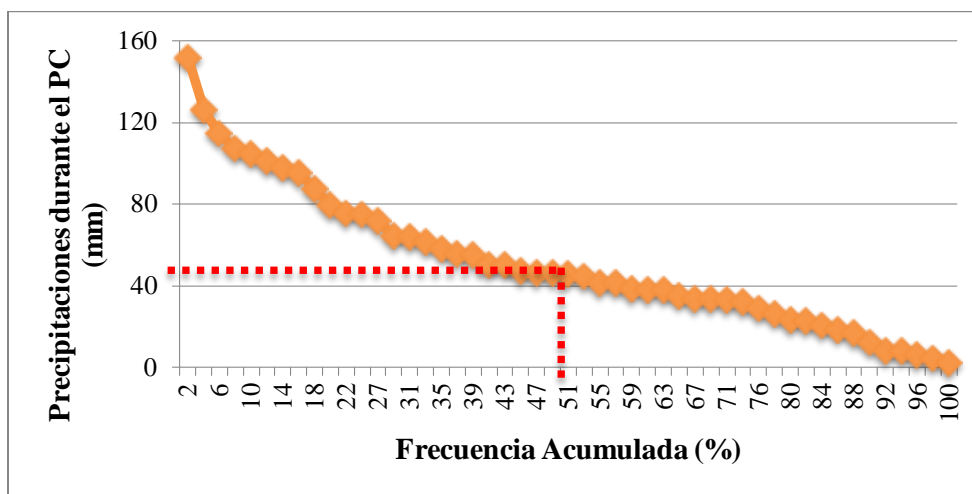


Figura 2. Precipitaciones (mm) durante el periodo crítico del cultivo de trigo en función de la frecuencia acumulada (%) para el periodo 1968-2016. La línea roja punteada representa los mm precipitados durante el periodo crítico (PC) para una frecuencia acumulada del 50%. Datos obtenidos de la EEA INTA Las Breñas. Fecha de floración empleada para el cálculo: 1-Sep.

Una vez fijado el número de granos, el suministro de asimilados al grano de trigo en desarrollo proviene tanto de la generación actual de asimilados a los granos como de la removilización de asimilados almacenados temporalmente en partes vegetativas (Gebbing & Schnyder, 1999). Las reservas depositadas en órganos fuentes antes de la antesis pueden amortiguar las disminuciones del rendimiento en grano cuando las condiciones se tornan adversas para la fotosíntesis y la absorción de nutrientes durante la fase de llenado de granos (Tahir & Nakata, 2005). La importancia relativa de la asimilación actual y la removilización estará directamente influenciada por la cantidad de destinos fijados, lo cual a su vez depende de las condiciones ambientales durante el ciclo del cultivo (Arduini *et al.*, 2006).

Además de la importancia que tiene la disponibilidad hídrica por su impacto en la fijación de granos y posterior llenado de los mismos, Sinclair & Jamieson (2006) enfatizan la importancia de la disponibilidad de nitrógeno (N) para el desarrollo de las estructuras vegetativas y reproductivas durante todo el ciclo del cultivo de trigo. A nivel fisiológico, la baja absorción de nitrato del suelo conduce a una menor concentración de nitrato en el xilema y a una mayor acumulación de ácido abscísico tanto en las hojas como en las estructuras reproductivas, reduciendo el número de estructuras reproductivas (Liu *et al.*, 2005). De ahí la importancia de realizar estudios que contemplen la aplicación de N por medio de fertilizantes y establecer el grado de interacción con la componente hídrica.

En condiciones de secano, la aplicación de N aumenta la eficiencia del uso del agua y viceversa. Sin embargo, existe una tasa óptima de suministro de agua o aplicación de N, más allá de la cual los

incrementos en uno pueden no provocar un aumento en el uso del otro (Benbi, 1990). La aplicación de N aumenta el rendimiento en grano y la eficiencia del uso del agua. Sin embargo, la respuesta del cultivo de trigo a distintas disponibilidades de agua y su interacción con la fertilización nitrogenada merece especial atención.

Objetivo general

- Evaluar los cambios en el rendimiento en grano del cultivo de trigo ante el incremento en la disponibilidad hídrica a la siembra y al inicio del período crítico bajo diferentes dosis de nitrógeno.

Objetivos específicos

- Evaluar la intercepción de la radiación, la tasa de crecimiento del cultivo y los componentes numéricos del rendimiento en trigo frente a variaciones en la disponibilidad de agua a la siembra y al inicio del período crítico ante cambios en la disponibilidad de N.
- Determinar la partición de asimilados y su posible removilización ante cambios en la disponibilidad hídrica y nitrogenada.
- Analizar el efecto de los tratamientos sobre la eficiencia en el uso del agua.

Materiales y métodos

El presente trabajo se realizó en la localidad de San Bernardo, Provincia del Chaco (27°15'15.8"S; 60°45'41.5"O; 90 msnm). El suelo se encuentra clasificado como Argiustol Údico, familia arcillosa fina, ilítica, hipertérmica, correspondiente a la serie Matanza (Ledesma, 1982). Los cultivos que participan en la rotación son girasol, sorgo y soja, siendo este último el cultivo antecesor a la siembra.

El control químico de malezas constó de una aplicación de Metsulfurón-metil (equivalente a 8 gramos por hectárea) y Paraquat dicloruro (equivalente a 3 litros por hectárea) en pre-siembra.

La siembra se realizó el día 9 de junio del año 2018 con una sembradora de grano grueso de placas horizontales para soja (maquinaria disponible por el productor), con los trenes de siembra distanciados a 0,52 m, realizando una doble pasada con el fin de obtener un distanciamiento final de 0,26 metros entre hileras, y logrando de esta manera establecer una densidad de alrededor de 185 semillas por metro cuadrado.

La variedad de trigo utilizada fue Klein Nutria, la cual es de ciclo corto, posee una altura media, con excelente comportamiento ante el vuelco, desgrane y brotado, no requiere vernalización, tiene baja

sensibilidad al fotoperíodo y está catalogada como tolerante a *Puccinia triticina*, *P. striiformis*, *P. graminis*, *Drechslera tritici-repentis*, *Septoria tritici* y *Fusarium graminearum*. Además, Klein Nutria es una de las variedades más sembradas actualmente en la región NEA (A. Weiss, comunicación personal).

Se utilizó un diseño factorial en parcelas divididas con tres repeticiones. En las parcelas principales (2,04 metros de ancho x 6 metros de largo cada una) se realizaron aportes de una lámina de agua equivalente a 50 mm previo a la siembra y 45mm al inicio del período crítico (PC) y un tratamiento control sin riego. Los 45 mm de lámina se tomaron como referencia de que se produzca, uno de cada dos años, precipitaciones de esa cuantía durante el PC. Las parcelas principales quedaron conformadas de la siguiente manera: (i) aplicación de 50 mm previo a la siembra (50S), (ii) aplicación de 50 mm previo a la siembra y de 45 mm en el inicio del período crítico (50S+45IPC), y (iii) un tratamiento control sin aporte de lámina de agua (T). El aporte de agua en las parcelas principales se realizó por medio de regaderas (7 L c/u). Con el fin de evitar errores producidos por posibles escurrimientos superficiales y sub-superficiales, las parcelas principales fueron separadas por borduras de igual ancho (2,04 m). En 50S, el riego equivalente a 50 mm por hectárea (todas las parcelas excluyendo los testigos) se realizó con un intervalo suficiente para permitir la infiltración del agua y evitar así la pérdida de la misma por escurrimiento superficial. En 50S+45IPC se procedió de la misma manera. Cada parcela principal fue dividida en tres (2,04 metros de ancho x 2 metros de largo) quedando confeccionadas las subparcelas: (i) sin aportes de nitrógeno durante todo el ciclo del cultivo (N0), (ii) aplicación de 20,4 gramos de nitrógeno, equivalente a 50 kilogramos por hectárea (N50), (iii) aplicación de 40,8 gramos de nitrógeno equivalente a 100 kilogramos por hectárea (N100). Con el fin de disminuir al mínimo la posibilidad de pérdida de nitrógeno por desnitrificación y volatilización al aplicar el fertilizante, la fuente de N fue urea granulada ($\text{CO}[\text{NH}_2]_2$; 46% N), la cual fue diluida en agua y aplicada con regadera el mismo día de la siembra. Las dosis empleadas se basaron en el análisis de suelo realizado a la siembra del cultivo antecesor (1/01/2018; Tabla 1) y en los umbrales de respuesta del cultivo generados en trabajos previos realizados en el sudoeste bonaerense (Calviño et al., 2002; Barbieri et al., 2009).

Tabla 1:

Espesor en cm	Materia Orgánica %	Sales C.E. dS/m	pH	Nitrógeno total %	Nitratos NO_3 ppm	Fósforo ppm	Potasio	Magnesio	Calcio	Sodio	Azufre
							K	Mg	Ca	Na	SO_4
							meq/100 gr.			%	ppm
0-20	2,95	1,1	6,7	0,18	56,8	74,3	0,71	6,8	13,6	26,6	19,8

Variables medidas

Evapotranspiración (EvT)

Se extrajeron muestras de suelo hasta los 140 centímetros de profundidad, en estratos de 20 centímetros de espesor. Los momentos de muestreo fueron en siembra y cosecha del trigo, utilizando un barreno de tipo calador (Tornomar, Argentina). Las muestras fueron rotuladas y llevadas a laboratorio, donde fueron pesadas en balanza de precisión para conocer su peso húmedo (PH). Posteriormente fueron llevadas a estufa, a una temperatura de 105°C. Pasadas las 48 horas con exposición a dichas temperaturas, las muestras fueron retiradas y vueltas a pesar para conocer su peso seco (PS) y obtener así, el contenido gravimétrico de agua de la muestra (Hp), utilizando la fórmula:

$$Hp = \left(\frac{PH - PS}{PS} \right)$$

Además, se tomaron muestras de suelo para determinar la densidad aparente (DA) de los distintos estratos mediante el método del cilindro (Porta Casanellas *et al.*, 2003) y de esa forma poder calcular la lámina de agua de cada estrato (200 mm) con el siguiente cálculo:

$$L \text{ (mm)} = Hp * DA * 200$$

Donde Hp es el contenido gravimétrico de agua de la muestra y DA es la densidad aparente del suelo.

Finalmente, para obtener el valor de EvT se empleó la ecuación adaptada de Zhang *et al.* (2008):

EvT (mm) = Precipitaciones + Aporte de agua + Diferencia de la lámina de agua inicial y final. Debido a la intensidad y cuantía de las precipitaciones durante el ciclo del cultivo, todos los milímetros de lluvia precipitados se consideraron efectivos (i.e., pérdidas por escorrentía y drenaje despreciables).

Índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI)

El índice fue obtenido mediante el uso de un sensor portátil (Trimble GreenSeeker). Las mediciones se realizaron manteniendo el sensor a una distancia aproximada de 70 cm sobre el canopeo. Cada valor de NDVI fue el promedio de una doble pasada en los surcos centrales de cada unidad experimental.

Intercepción de radiación

Se realizaron mediciones con un ceptómetro (MQ-301, Apogee Instruments, USA) en cada subparcela, desde el centro de un entresurco hasta el centro del entresurco contiguo, entre las 11:30 y 13:00 horas, en días soleados y despejados. El porcentaje de radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi) por el cultivo se calculó como $[1 - (I_T / I_0)] \times 100$, donde I_T es la RFAi medida

entre el suelo y la primera hoja verde, e I_0 es la radiación fotosintéticamente activa incidente por encima del canopeo del cultivo.

Producción de biomasa aérea en el periodo crítico y partición a espiga

Se realizaron dos muestreos destructivos de la biomasa aérea en los días 17 de agosto y 21 de septiembre. Estos muestreos representaron aproximadamente la producción de biomasa al inicio y final del periodo crítico (IPC y FPC, respectivamente). Los cortes de biomasa fueron efectuados en un líneo completo por subparcela (2 metros lineales x 0,26 metros entre surco = $0,52 \text{ m}^2$) dejando las borduras correspondientes. El material fue llevado a estufa a 65°C hasta peso constante para la posterior cuantificación de la materia seca (MS). Los resultados fueron expresados por unidad de superficie (g m^{-2}) e identificados como MS_{IPC} y MS_{FPC} para los muestreos de inicios y final del periodo crítico, respectivamente. En el muestreo efectuado al FPC se obtuvo una alícuota de 10 plantas por muestra, las cuales fueron fraccionadas en espiga y tallo + hojas. Con estos valores se cuantificó la fracción a espiga (Fr Esp) como el cociente entre el peso de las espigas y el peso de tallos + hojas.

Partición a madurez, rendimiento en grano (RG) y eficiencia en el uso del agua (EUA)

Al momento de cosecha, en el último muestreo de biomasa aérea, luego de haberse realizado el pesaje de MS total (MStot) y de espigas, se realizó el conteo de espigas por muestra ($0,52 \text{ m}^2$) para luego extrapolar su valor a 1 m^2 (Esp m^{-2}). Finalizado este paso, se prosiguió a realizar la “trilla” o separación manual de los granos de trigo del resto de la paja, para realizar el pesaje de los granos por muestra y a partir de este dato poder calcular el RG (g m^{-2}).

Con los datos de MStot y RG se obtuvo el índice de cosecha (IC) usando la siguiente ecuación:

$$\text{IC} = \text{RG} / \text{MStot}$$

Con el valor de RG se calculó la biomasa de granos (kilogramos por hectárea) y utilizando la relación entre biomasa de granos y los milímetros de agua evapotranspirados para cada tratamiento, se obtuvo la EUA.

$$\text{EUA} = \text{biomasa de granos} / \text{EvT}$$

Análisis estadístico

Todos los datos fueron analizados estadísticamente con el software estadístico Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2015). Se emplearon el análisis de la varianza (ANAVA) y el test de comparación de medias (LSD Fisher).

Resultados y discusión

En un año de elevada pluviometría (+33,8% respecto al promedio histórico anual) algunas variables medidas no presentaron diferencias significativas al contrastar al testigo con los tratamientos con aporte de agua. Inclusive, esta tendencia se mantuvo cuando se consideró el periodo emergencia-cosecha (+31,16% del promedio histórico de precipitaciones). A escala de lote, el cultivo de soja previo a la siembra tuvo buena pluviometría en gran parte de su ciclo (Figura 3) y las precipitaciones durante el ciclo del cultivo de trigo fueron de 120 mm.



Figura 3. Evolución diaria de la temperatura (°C; línea amarilla) y precipitación (mm; barras celestes) para el año 2018. Las flechas verde y naranja simbolizan los momentos de siembra y cosecha del cultivo de trigo. Datos obtenidos de la EEA INTA Las Breñas y brindados por el productor, respectivamente.

El rendimiento en grano varió entre 221,87 y 392,87 g m⁻² para los tratamientos 50S con 0N y 50S+45IPC con 100N, respectivamente. No obstante, 50S con 0N no presentó diferencias significativas con el T con 0N. La fertilización con N incrementó los rendimientos de manera diferencial dependiendo la disponibilidad hídrica. En este sentido, las dosis de 50 y 100 de N aumentaron los rendimientos en el testigo (13,76% y 13,68%, respectivamente), con aporte de agua a la siembra (61,63% y 59,99%) y aporte de agua a la siembra e inicio del periodo crítico (19,59% y 47,69%). Esto explica la interacción significativa agua*N (Tabla 2). Se ha reportado también que el agua y la

fertilización nitrogenada son variables que interactúan (Ramig & Rhoades, 1963; Young *et al.*, 1967; Hinman, 1974). La respuesta a la aplicación de N aumentó a medida que se incrementó el suministro de agua, lo cual concuerda con los resultados obtenidos por Singh *et al.* (1975).

Tabla 2: Efecto de la combinación de los tratamientos de agua y fertilización sobre el rendimiento en grano (RG), el número de espigas por metro cuadrado (Esp m⁻²), la eficiencia en el uso del agua (EUA), la evapotranspiración (EvT), la materia seca total a cosecha (MStot) y el índice de cosecha (IC). Los aportes de agua fueron de 50 mm a la siembra (50S) y 50 mm a la siembra + 45 mm al inicio del periodo crítico (50S+45IPC) y un control sin aporte (T). La fertilización con N se efectuó a la siembra con el equivalente a 50 y 100 kg N ha⁻¹ (50 y 100N, respectivamente) y un control (0N).

Aporte de agua	Dosis de N	RG	Esp m ⁻²	EUA	EvT	MStot	IC
		g m ⁻²		kg / mm	mm	g m ⁻²	
T	0N	256,1 de	266,0 ef	9,8 ab	259,9 d	635,5 cd	0,40 ab
	50N	291,3 cd	298,1 de	10,5 a	277,5 cd	709,3 bcd	0,41 ab
	100N	291,1 cd	307,7 cde	10,0 a	291,5 c	649,6 cd	0,46 a
50S	0N	221,9 e	236,5 f	7,5 c	296,3 c	590,9 d	0,38 b
	50N	358,6 ab	352,6 bc	10,5 a	340,9 b	872,3 ab	0,41 ab
	100N	355,0 ab	365,4 ab	10,3 a	345,8 b	865,7 ab	0,41 ab
50S+45IPC	0N	266,0 de	284,0 def	7,8 c	342,4 b	665,5 cd	0,40 ab
	50N	318,1 bc	332,7 bcd	8,6 bc	369,1 ab	799,1 bc	0,40 ab
	100N	392,9 a	401,9 a	10,3 a	381,6 a	972,5 a	0,40 ab
p – valor (ANAVA)							
Agua		0,0077	0,0071	0,007	<0,0001	0,0136	ns*
N		<0,0001	<0,0001	0,0001	0,0003	0,001	ns
Agua * N		0,0065	0,0353	0,0056	ns	ns	ns

*ns = no significativo (p > 0,05).

Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos (LSD Fischer, p < 0,05).

Los incrementos en rendimiento estuvieron fuertemente asociados con el número de espigas por m⁻² (Figura 4; r² = 0,93). Existen varios trabajos que muestran que la disponibilidad hídrica y el N aumentan el número de espigas por unidad de área (Frederick & Camberato, 1995; Pandey *et al.*, 2001; Sinclair & Jamieson, 2006; Bavar *et al.*, 2016). El número de espigas por metro cuadrado es uno de los componentes del rendimiento más importantes, ya que afecta directamente al número de granos por metro cuadrado.

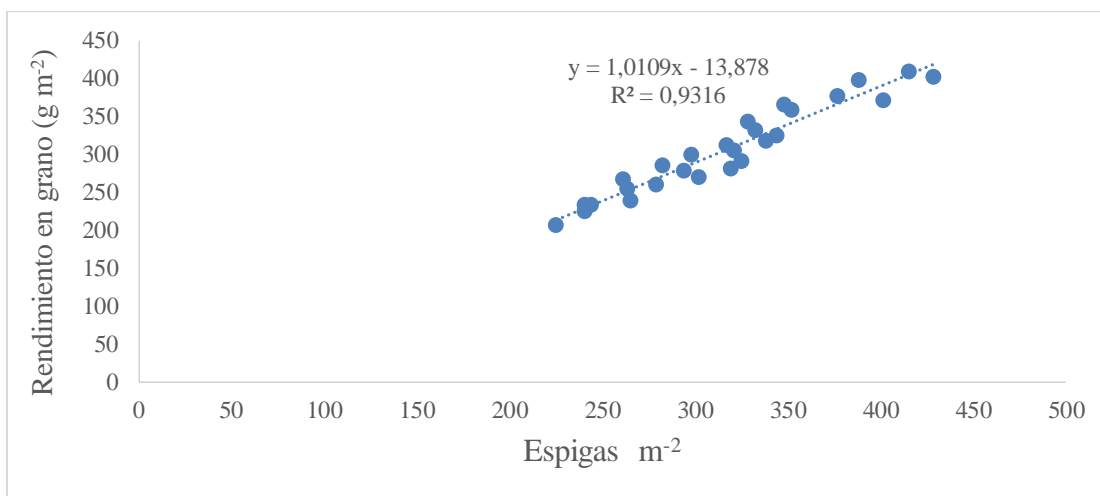


Figura 4. Rendimiento en grano en función de las Esp m^{-2} para un lote ubicado en San Bernardo, Chaco. Los tratamientos surgieron de la combinación de distintos aportes de agua (50 mm a la siembra, 50 mm a la siembra + 45 mm al inicio del periodo crítico y un control sin aporte de agua) y distintos niveles de fertilización nitrogenada (0, 50 y 100 kg N ha^{-1}).

Existen varios trabajos que demuestran que el aumento en la disponibilidad hídrica y de N conduce a incrementos en el número de macollos fértiles por unidad de superficie y consecuentemente, el número de espigas fértiles (Power & Alessi, 1978; Ali *et al.*, 2011; Sattar *et al.*, 2020). Más aún, las Esp m^{-2} se relacionaron positivamente con la eficiencia en el uso del agua y el grado de ajuste dependió de la dosis de N (Figura 5). Esto explica la interacción agua*N para la variable EUA (Tabla 2).

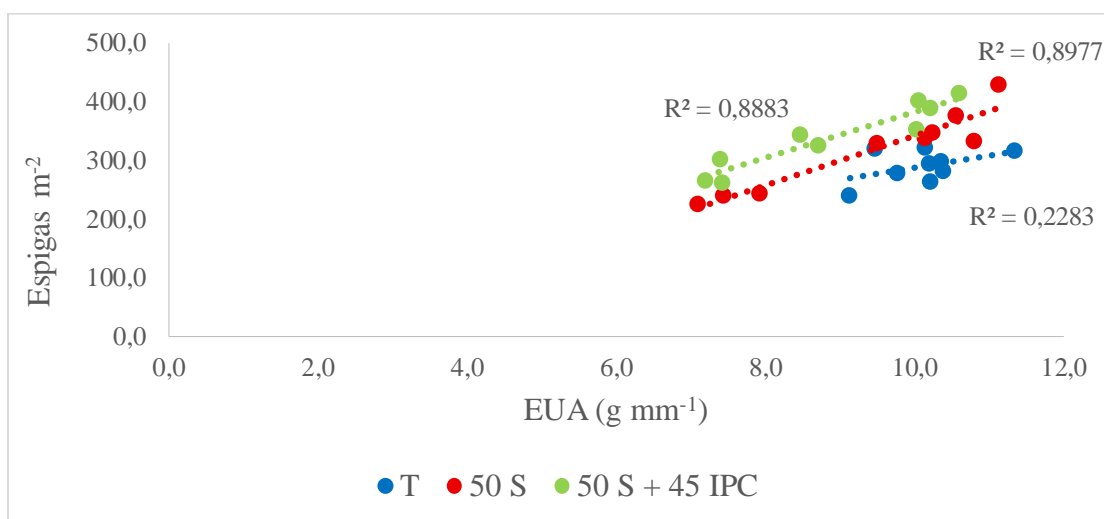


Figura 5. Espigas m^{-2} en función de la EUA para tratamientos sin aporte de agua ($R^2 = 0,2283$; $n = 9$; $p < 0,1854$), con aporte de 50 mm a la siembra ($R^2 = 0,8977$; $n = 9$; $p < 0,0001$) y 50 mm a la siembra + 45 mm al inicio del periodo crítico ($R^2 = 0,8883$; $n = 9$; $p < 0,0001$), en un lote ubicado en San Bernardo, Chaco. Los puntos representan las distintas dosis de N (0, 50 y 100 kg N ha^{-1}).

Coincidentemente con estudios previos (Singh *et al.*, 1975; Benbi, 1990; Kibe *et al.*, 2006; Lenka *et al.*, 2009), tanto las eficiencias en el uso del agua como el N parecen ser variables complejas y conectadas dada la interacción agua*N también presente en este trabajo. Esto puede atribuirse a que una adecuada disponibilidad hídrica también conduce a que el nitrógeno se aproveche con mayor eficiencia. Por ejemplo, el déficit de hídrico puede limitar el movimiento del N en el suelo y así reducir la absorción de este nutriente (Benjamin *et al.*, 1997). No obstante, aumentos en los contenidos de agua del suelo producen un aumento en el uso del nitrógeno hasta cierto punto, a partir del cual no se refleja dicho aumento (Benbi, 1990). Como se mencionó, las parcelas 50S y 50S+45IPC presentaron mejor respuesta del rendimiento en grano al agregado de N (Tabla 2).

A pesar de los incrementos en la EUA, la fertilización con N también afectó significativamente ($p < 0,05$) la EvT en el periodo siembra-cosecha (Tabla 2 y Figura 6), con aumentos promedio respecto al control de 9,9 y 13,4% para los tratamientos de N50 y N100, respectivamente. La escasez de nitrógeno puede reducir la evapotranspiración y la eficiencia en el uso del agua en trigo (Brown, 1971; Heitholt, 1989; Nielsen & Halvorson, 1991), lo que posiblemente esté dado por una disminución en la intercepción de la radiación. Caviglia y Sadras (2001) muestran que la escasez de N provoca una caída de la MS producida por unidad de radiación interceptada (i.e., eficiencia en el uso de la radiación). En este sentido, el aumento de la EvT en este trabajo en gran parte puede ser atribuido a los incrementos en RFAi. Por ejemplo, las parcelas con la mayor dosis de N (equivalente a 100 kg ha^{-1}), presentaron en promedio, un 26,5% de intercepción mayor que los controles sin aporte de N. Cabe aclarar que las dosis de 50 y 100 kg de N no presentaron diferencias significativas para las variables RFAi (75,33 y 81,27%, respectivamente; promedio entre aporte hídrico; Tabla 3) y EvT (329,2 y 339,6 mm). Estos resultados refuerzan la fuerte asociación existente entre RFAi y EvT.

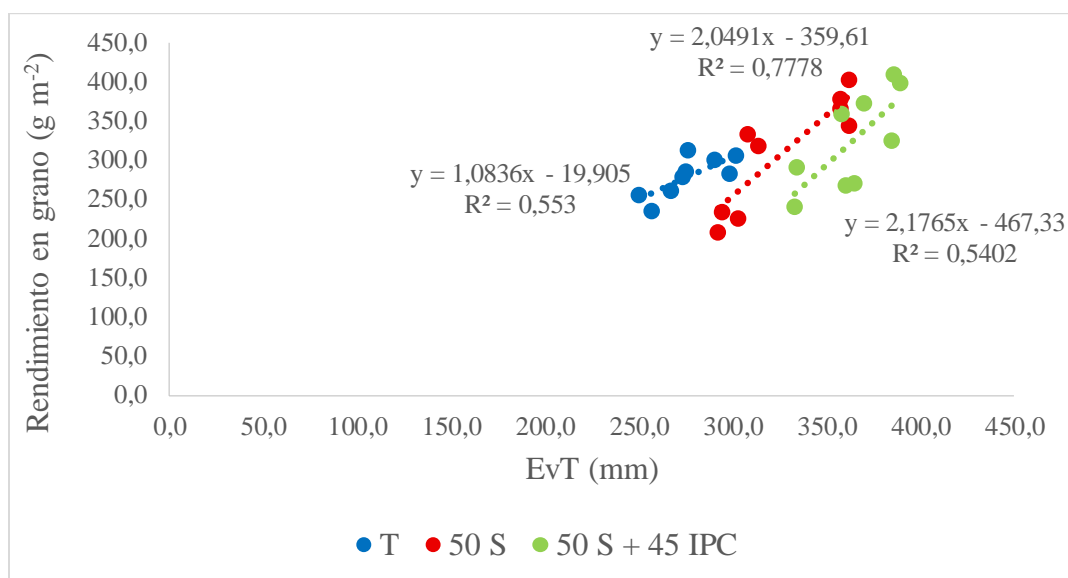


Figura 6. Rendimiento en grano en función de la EvT para tratamientos sin aporte de agua (círculos azules; $R^2 = 0,553$; $p < 0,0216$), con aporte de 50 mm a la siembra (círculos rojos; $R^2 = 0,7778$; $p < 0,0017$) y 50 mm a la siembra + 45 al inicio del periodo crítico (círculos verdes; $R^2 = 0,5402$; $p < 0,0239$) para un lote ubicado en San Bernardo, Chaco. Cada tratamiento de aporte de agua recibió tres dosis de N (0, 50 y 100 kg N ha⁻¹).

En este trabajo, como se destacó anteriormente, las precipitaciones durante el año fueron superiores al promedio histórico, por lo cual el agua no fue la principal limitante para el trigo, lo que podría explicar por qué no existieron diferencias significativas al inicio y final del PC para la fuente de variación agua y sí para N (Tabla 3). No obstante, los tratamientos sin aporte de agua (T), donde la producción de biomasa al inicio o final del periodo crítico fue afectada por la fertilización con N (Figuras 7A y B, respectivamente), pero no se vio reflejada en incrementos considerables del rendimiento en grano. Sadras (2002) muestra cómo en escenarios de sequía terminal (como habitualmente transcurre el cultivo del trigo en el Sudoeste Chaqueño), un elevado suministro de N produce caídas en los rendimientos, mientras que la producción de biomasa no se ve afectada, pero ambas variables son beneficiadas por la fertilización en aquellas situaciones en las que el agua precipitada es mayor. Por otra parte, la MS total a cosecha sí presentó diferencias para ambas fuentes de variación (Tabla 2), posiblemente debido a reducciones en la disponibilidad hídrica desde floración en adelante.

Tabla 3: Efecto de la combinación de los tratamientos de agua y fertilización sobre el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI), la radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo (RFAi), la materia seca al inicio y al final del período crítico (MS_{IPC} y MS_{FPC}, respectivamente) y la participación de la espiga en el peso total de la biomasa aérea (Fr Esp). Los aportes de agua fueron de 50 mm a la siembra (50S) y 50 mm a la siembra + 45 mm al inicio del periodo crítico (50S+45IPC) y un control sin aporte (T). La fertilización con N se efectuó a la siembra con el equivalente a 50 y 100 kg N ha⁻¹ (50 y 100N, respectivamente) y un control (0N).

Aporte de agua	Dosis de N	RFAi	MS _{IPC}	MS _{FPC}	Fr Esp	NDVI
		%	g m ⁻²			
T	0N	67,7 abc	182,6 ab	519,2 bc	0,34 a	0,60 cd
	50N	67,3 abc	184,7 ab	577,0 ab	0,38 a	0,64 bcd
	100N	78,6 ab	198,7 ab	569,4 ab	0,38 a	0,69 ab
50S	0N	64,1 bc	155,6 b	442,6 c	0,40 a	0,56 d
	50N	78,9 ab	206,8 ab	527,0 bc	0,36 a	0,67 abc
	100N	82,8 a	224,2 a	557,7 b	0,38 a	0,71 ab
50S+45IPC	0N	60,9 c	145,7 b	485,1 bc	0,38 a	0,58 cd
	50N	79,8 ab	170,5 ab	579,9 ab	0,39 a	0,64 bcd
	100N	82,4 a	232,7 a	675,2 a	0,39 a	0,74 a
p-valor (ANAVA)						
Agua		ns	ns	ns	ns	ns *
N		0,0043	0,0137	0,0038	ns	0,0002
Agua * N		ns	ns	ns	ns	ns

*ns = no significativo (p > 0,05).

Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos (LSD Fischer, α = 0,05).

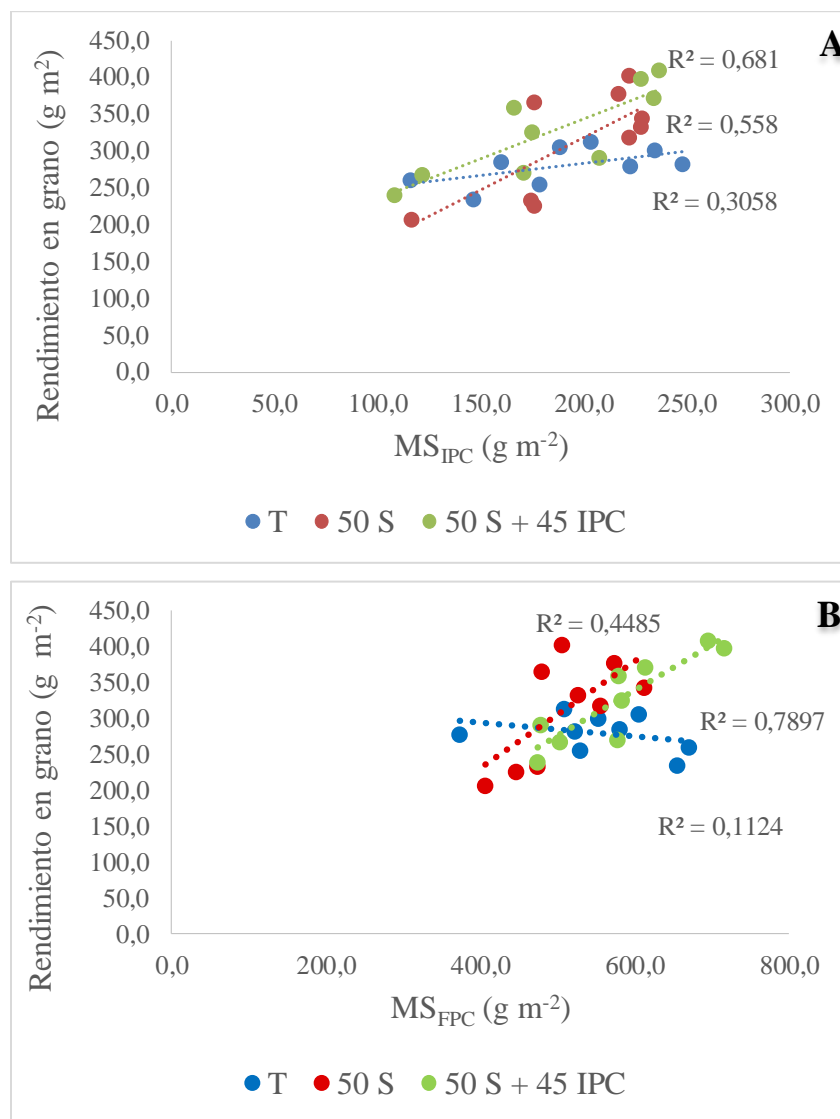


Figura 7. Rendimiento en grano en función de la MS (g m^{-2}) producida al inicio (A) y final (B) del periodo crítico (PC), para los tratamientos sin aporte de agua (azul), con aporte de 50 mm a la siembra (rojo) y 50 mm a la siembra + 45 al inicio del periodo crítico (verde) para un lote ubicado en San Bernardo, Chaco. Los puntos representan distintas dosis de nitrógeno.

La partición a grano en cosecha (o índice de cosecha, IC) y la fracción espiga al final del periodo crítico (Fr Esp), no fueron afectados por los tratamientos (Tablas 2 y 3, respectivamente). El cambio en el IC implica importantes ajustes de recursos como el nitrógeno, porque el mismo no se encuentra en la misma concentración en el grano que en la paja, por lo que cualquier cambio relevante en la fracción relativa del grano y paja requieren grandes cambios en la acumulación de nitrógeno por la planta (Sinclair, 1998). Al ser soja el cultivo antecesor con rendimientos cercanos a los 3.200 kg ha^{-1} , probablemente los niveles de nitratos mineralizados en suelo fueron elevados y así el cultivo no reflejó significativos cambios en la partición de asimilados.

Por último, el NDVI muestra aumentos significativos con la fertilización nitrogenada (Tabla 3), presentando incluso variaciones ante los cambios en las dosis de N. Estos resultados concuerdan con el trabajo de Cabrera-Bosquet *et al.* (2011) en el que también se puede ver una fuerte correlación entre N y NDVI en el cultivo de trigo. Además, el aporte de agua incrementó la pendiente de respuesta en los tratamientos de 50S y 50S+45IPC (Figura 8). Similar a lo ocurrido para las otras variables, no se presentaron variaciones entre T, 50S y 50S+45IPC ni su interacción con N para el NDVI.

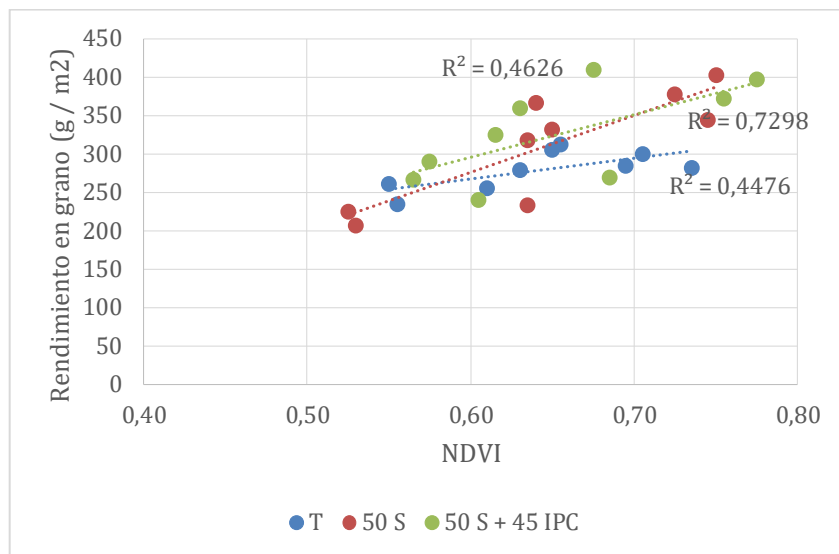


Figura 8. Rendimiento en grano en función del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para tratamientos sin aporte de agua (círculos azules), con aporte de 50 mm a la siembra (círculos rojos) y 50 mm a la siembra + 45 al inicio del periodo crítico (círculos verdes) para un lote ubicado en San Bernardo, Chaco. Cada tratamiento de aporte de agua recibió tres dosis de N (0, 50 y 100 kg N ha⁻¹).

Conclusiones

Los aportes de agua (50S y 50S+45IPC) incrementaron la biomasa producida a cosecha y el rendimiento en grano, lo cual no se vio reflejado en la biomasa al inicio y al final del periodo crítico. Esto posiblemente fue debido a que las precipitaciones durante el ciclo del cultivo fueron superiores al promedio histórico.

El rendimiento en grano respondió mejor al agregado de N en aquellas parcelas con tratamientos de agregado de agua, obteniendo las mayores respuestas cuanto mayor fue el suministro de agua. A su vez, como era de esperar, estos incrementos estuvieron estrechamente relacionados con el número de espigas por unidad de superficie.

La partición de asimilados a espiga y grano (en FPC y a cosecha, respectivamente) no fue modificada por el aporte de agua, N o su interacción.

El aporte de N aumentó la eficiencia en el uso de agua como así también la evapotranspiración sin diferencias significativas entre las dosis de 50 y 100 kg de N ha⁻¹. Los aumentos en la evapotranspiración fueron consecuencia de mayores niveles de intercepción de la radiación e incrementos del vigor de la vegetación (i.e., NDVI) como consecuencia de la mayor disponibilidad de N.

Bibliografía

- Ali, A., Syed, A. A. W., Khaliq, T., Asif, M., Aziz, M., & Mubeen, M. (2011). Effects of nitrogen on growth and yield components of wheat. (Report). *International Journal of Biological Sciences* (Vol. 3, No. 6, pp. 1004-1005).
- Álvarez, R., Abbate, P., Alzueta, I., Angeli, A., Arias, S., Bader, J., Bello, J., Bonamico, M., Carabaca, L., Carnevale, I., Correndo, A., Di Napoli, M., Duarte, G., Ermacora, M., Fava, F., Ferraris, G., Ferrero, G., Furlani, C., Gálvez, S., García, F., García, G., García Frugoni, F., Giorno, A., Granieri, L., González Montaner, J., Leurino, G., López, D., Miralles, D., Parra, V., Paolini, M., Pozzi, R., Rossi, D., Roza Ortega, G., Satorre, E., Sillon, M., Steinbach, H., Suino, E., Tinghitella, G., Tobal, J., Tomacelli, J., Turchi, D. & Zucal, Marcelo (Eds.). (2017). Manual de Trigo. Su rol en los sistemas de producción agrícola. Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola, AACREA. ISBN 978-987-1513-29-1. 104 p.
- Arduini, I., Masoni, A., Ercoli, L., & Mariotti, M. (2006). Grain yield, and dry matter and nitrogen accumulation and remobilization in durum wheat as affected by variety and seed inrate. *European Journal Agronomy*. 25, 309-318.
- Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R. P., Lobell, D. B., Cammarano, D., Kimball, B. A., Ottman, M. J., Wall, G. W., White, J. W., Reynolds, M. P., Alderman, P. D., Prasad, P. V. V., Aggarwal, P. K., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Challinor, A. J., De Sanctis, G., Doltra, J., Fereres, E., Garcia-Vila, M., Gayler, S., Hoogenboom, G., Hunt, L. A., Izaurralde, R. C., Jabloun, M., Jones, C. D., Kersebaum, K. C., Koehler, A-K., Müller, C., Naresh Kumar, S., Nendel, C., O'Leary, G., Olesen, J. E., Palosuo, T., Priesack, E., Eyshi Rezaei, E., Ruane, A. C., Semenov, M. A., Shcherbak, I., Stöckle, C., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Thorburn, P. J., Waha, K., Wang, E., Wallach, D., Wolf, J., Zhao, Z., & Zhu Y. (2015). Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature climate change*. 5(2), 143-147.
- Barbieri, P., Echeverría, H., & Sainz Rozas, H. (2009). Nitratos en el suelo a la siembra o al macollaje como diagnóstico de la nutrición nitrogenada en trigo en el sudeste bonaerense. *Ciencia del suelo*. 27(1), 41-47.
- Barnabás, B., Jäger, K., & Fehér, A. (2008). The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant, Cell & Environment*. 31, 11-38.

- Bavar, M., Abad, H. H. S., & Noormohamadi, G. (2016). The effects of different levels of nitrogen on yield and yield components of rainfed wheat in two Regions of North Khorasan. *Open Journal of Ecology*. 6(07), 443.
- Benbi, D.K. (1990). Efficiency of nitrogen use by dry land wheat in a subhumid region in relation to optimizing the amount of available water. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*. 115, 7-10.
- Benjamin, J. G., Porter, L. K., Duke, H. R., & Ahuja, L. R. (1997). Corn growth and nitrogen uptake with furrow irrigation and fertilizer bands. *Agronomy Journal*. 89(4), 609-612.
- Blum, A. (2009). Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Australian Journal of Agricultural Research*. 56, 1159–1168.
- Blum, A., Sinmena, B., Mayer, J., Golan, G., & Shpiler, L. (1994). Stem reserve mobilization supports wheat grain filling under heat stress. *Australian Journal of Agricultural Research*. 21, 771-781.
- Brown, P. L. (1971). Water Use and Soil Water Depletion by Dryland Winter Wheat as Affected by Nitrogen Fertilization 1. *Agronomy Journal*. 63(1), 43-46.
- Bruce, W. B., Edmeades, G. O., & Barker, T. C. (2002). Molecular and physiological approaches to maize improvement for drought tolerance. *Journal of experimental botany*. 53(366), 13-25.
- Cabrera-Bosquet, L., Molero, G., Stellacci, A., Bort, J., Nogues, S., & Araus, J. (2011). NDVI as a potential tool for predicting biomass, plant nitrogen content and growth in wheat genotypes subjected to different water and nitrogen conditions. *Cereal Research Communications*. 39(1), 147-159.
- Calviño, P., Echeverría, H. E., & Redolatti, M. (2002). Diagnóstico de nitrógeno en trigo con antecesor soja bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Ciencia del suelo*. 20(1), 36-42.
- Caviglia, O. P., & Sadras, V. O. (2001). Effect of nitrogen supply on crop conductance, water-and radiation-use efficiency of wheat. *Field Crops Research*. 69(3), 259-266.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., & Robledo C.W. InfoStat versión (2015). Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Fischer, R. A. (1985). Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *The Journal of Agricultural Science*. 105, 447-461.
- Fontanetto, H., Keller, O., Albrecht, J., Rufino, P., Borsarelli, J., Sillón, M., Belotti, L., Negro, C., & Giailevra, D. (2009). La importancia del agua edáfica a la siembra como estimador de los

rendimientos del trigo en el área central de Santa Fe. *IPNI Informes agronómicos del Cono Sur* N° 41:9-10.

- Food and Agriculture Organization. (2020). *FAOSTAT. Online Database*. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> (acceso en Octubre de 2020).
- Frederick, J. R., & Camberato, J. J. (1995). Water and nitrogen effects on winter wheat in the southeastern Coastal Plain: I. Grain yield and kernel traits. *Agronomy Journal*. 87(3), 521-526.
- Gebbing, T., & Schnyder H. (1999). Pre-anthesis reserve utilization for protein and carbohydrate synthesis in grains of wheat. *American Society of Plant Physiologists*. 121, 871–878.
- Heitholt, J. J. (1989). Water use efficiency and dry matter distribution in nitrogen-and water-stressed winter wheat. *Agronomy Journal*. 81(3), 464-469.
- Hinman, W. C. (1974). Effects of fertilizer and available moisture on the yield and N and P content of wheat and on soil nutrients. *Canadian Journal of Soil Science*. 54(2), 187-193.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). (2014). Sistema de información y gestión agrometeorológico. Argentina. Disponible en <http://siga2.inta.gov.ar/> (acceso en Octubre de 2020).
- Kibe, A. M., Singh, S., & Kalra, N. (2006). Water–nitrogen relationships for wheat growth and productivity in late sown conditions. *Agricultural Water Management*. 84(3), 221-228.
- Ledesma, L. (1982). Carta de suelos de la República Argentina. Los Suelos del Departamento O'Higgins. Convenio INTA – Gobierno del Chaco.
- Lenka, S., Singh, A. K., & Lenka, N. K. (2009). Water and nitrogen interaction on soil profile water extraction and ET in maize–wheat cropping system. *Agricultural Water Management*. 96(2), 195-207.
- Liu, F., Jensen, C.R., & Andersen, M.N. (2005). A review of drought adaptation in crop plants: changes in vegetative and reproductive physiology induced by ABA-based chemical signals. *Australian Journal of Agricultural Research*. 56, 1245-1252.
- Merlos, F. A., Monzon, J. P., Mercau, J. L., Taboada, M., Andrade, F. H., Hall, A. J., Jobbagy, E., Cassman, K. G., & Grassini, P. (2015). Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research*. 184, 145-154.
- Miralles, D.J., González, F.G., Abeledo, L.G., Serrago, R.A., Alzueta, I., García, G.A., de San Caledonio, R.P., & Lo Valvo, P. (2014). Manual de trigo y cebada para el Cono Sur. Procesos fisiológicos y bases de manejo. *1a ed. - Buenos Aires: Orientación Gráfica Editora*. 23-30. 56p. ISBN 978-987-1922-07-9.

- Nielsen, D. C., & Halvorson, A. D. (1991). Nitrogen fertility influence on water stress and yield of winter wheat. *Agronomy journal*. 83(6), 1065-1070.
- Pandey, R. K., Maranville, J. W., & Admou, A. (2001). Tropical wheat response to irrigation and nitrogen in a Sahelian environment. I. Grain yield, yield components and water use efficiency. *European Journal of Agronomy*. 15(2), 93-105.
- Parry, M. A. J., Flexas, J., & Medrano, H. (2005). Prospects for crop production under drought: research priorities and future directions. *Annals of Applied Biology*. 147(3), 211-226.
- Porta Casanellas, J., López Acevedo Reguerín, M., & Roquero De Laburu, C. (2003). Edafología: Para la agricultura y el medio ambiente. *Mundi-Prensa*.
- Power, J. F., & Alessi, J. (1978). Tiller development and yield of standard and semidwarf spring wheat varieties as affected by nitrogen fertilizer. *The Journal of Agricultural Science*. 90(1), 97-108.
- Ramig, R. E., & Rhoades, H. F. (1963). Interrelationships of soil moisture level at planting time and nitrogen fertilization on winter wheat production. *Agronomy Journal* 55. 123-127.
- Sadras, V. (2002). Interaction between rainfall and nitrogen fertilisation of wheat in environments prone to terminal drought: economic and environmental risk analysis. *Field Crops Research*. 77(2-3), 201-215.
- Sattar, A., Sher, A., Ijaz, M., Ullah, M. S., Ahmad, N., & Umar, U. U. (2020). Individual and combined effect of terminal drought and heat stress on allometric growth, grain yield and quality of bread wheat. *Pakistan Journal of Botany*. 52(2), 405-412.
- Sinclair, T. R. (1998). Historical changes in harvest index and crop nitrogen accumulation. *Crop Science*. 38(3), 638-643.
- Sinclair, T.R., & Jamieson, P.D. (2006). Grain number, wheat yield, and bottling beer: An analysis. *Field Crops Research*. 98, 60–67.
- Singh, R., Singh, Y., Prihar, S. S., & Singh, P. (1975). Effect of N fertilization on yield and water use efficiency of dryland winter wheat as affected by stored water and rainfall 1. *Agronomy Journal*. 67(5), 599-603.
- Tahir, I.S.A., & Nakata, N. (2005). Remobilization of nitrogen and carbohydrate from stems of bread wheat in response to heat stress during grain filling. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 191, 106-115.
- Trigo Argentino. (2020). Informe institucional de su calidad. Disponible en: <https://www.trigoargentino.com.ar/Est/filtros.aspx?idAnalisis=50&tipo=L> (acceso en Octubre de 2020).

- Young, R. A., Ozbun, J. L., Bauer, A., & Vasey, E. H. (1967). Yield response of spring wheat and barley to nitrogen fertilizer in relation to soil and climatic factors. *Soil Science Society of America Journal*. 31(3), 407-410.
- Zhang, X., Chen, S., Sun, H., Pei, D., & Wang, Y. (2008). Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat. *Irrigation Science, Springer*. 27, 1-10.