



FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

ÁREA DE CONSOLIDACIÓN
SISTEMAS AGRÍCOLAS DE PRODUCCIÓN EXTENSIVOS

*Rendimiento de trigo según dosis de nitrógeno
y densidad de siembra en condiciones de riego
en Villa del Rosario*

Autor / es:

Mansilla Gonzalo

Martino Lorenzo

Roatta Giuliano

Rolón Bautista

Tutor:

Dr. Marcelo Cantarero



AGRADECIMIENTOS

A la familia Ruiz Luque, dueños del establecimiento.

A nuestras familias por brindarnos apoyo y contención.

Y a Marcelo Cantarero por brindarnos su tiempo y conocimientos.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	6
INTRODUCCIÓN	7
OBJETIVO GENERAL	8
Objetivos específicos.....	8
MATERIALES Y MÉTODOS	9
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	12
Caracterización edáfica y meteorológica del sitio experimental	12
Densidades logradas	14
Periodo crítico	14
Rendimiento	17
Consumo y eficiencia de uso del agua	21
CONCLUSIONES	22
BIBLIOGRAFÍA.....	24
ANEXO.....	27

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Análisis de Suelo.....	12
Tabla 2. Caracterización meteorológica mensual de la campaña 2021.....	13
Tabla 3. Resultados durante período crítico.....	14
Tabla 4. Resultados de rendimiento.	17

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relación entre la TCC de cada tratamiento y el % de intercepción de radiación solar.	16
Figura 2. Relación lineal entre NG y RTO.....	19
Figura 3. Relación lineal entre PG y RTO.	20
Figura 4. Relación lineal entre NG y el % de intercepción de radiación solar.....	21

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue comparar el rendimiento del cultivo de trigo bajo riego, en tres densidades de siembra 40, 90 y 140 kg de semilla ha⁻¹ y tres niveles de fertilización nitrogenada, 0, 100 y 200 kg N ha⁻¹. Adicionalmente con una densidad de 110 kg ha⁻¹ se evaluó la incorporación de un arrancador (MicroEssentials® SZP®, compuesto por 12% de N; 40% P₂O₅; 10% de S; 1% de Zn) a la siembra, al cual también se le aplicó, 46 kg N ha⁻¹ al macollaje. El trabajo se llevó a cabo en el establecimiento “El Rincón” en la localidad de Rincón (Provincia de Córdoba), en la campaña 2021. Se utilizó un diseño experimental en parcelas subdivididas, correspondiendo la parcela principal a las densidades y las subparcelas a las dosis de N, con tres repeticiones. Durante el ciclo del cultivo se determinó el peso seco del cultivo al inicio (PS_{ini}) y fin (PS_{fin}) del periodo crítico, peso de las espigas (PESP) y el % de intercepción de la radiación por parte del cultivo (FI). Con estos datos se cuantificó la tasa de crecimiento del cultivo (TCC), el porcentaje de partición hacia espigas (Part) y la tasa de crecimiento de las mismas (TCE). A la madurez del cultivo se evaluó el peso seco (PS_{mad}), el rendimiento (RTO) y sus componentes numéricos, número de granos por unidad de superficie (NG) y el peso por grano (PG), y el índice de cosecha (IC). Se cuantificó el consumo (C) y la eficiencia en el uso del agua (EUA_{RTO}) de cada tratamiento. La fertilización nitrogenada produjo un aumento en FI, en la TCC, en la TCE, generando un aumento en el NG, y por lo tanto en el RTO y en la EUA_{RTO}. Al variar la densidad de siembra se encontraron diferencias significativas al pasar de 40 kg ha⁻¹ a 90 y 140 kg ha⁻¹, siendo estas dos últimas superiores para las variables EUA_{RTO}, RTO y FI. En el tratamiento adicional se observaron diferencias significativas en todas las variables analizadas. Teniendo en cuenta el análisis de suelo y los resultados, recomendamos la aplicación del arrancador y además lograr 245 plantas m⁻² y aplicar una dosis de 100 kg N ha⁻¹.

Palabras Clave: Trigo, densidad, fertilización, rendimiento.

INTRODUCCIÓN

El trigo es un cereal del género *Triticum* perteneciente a la familia de las Poáceas. Su origen es de la región asiática, entre Irak y Siria, desde donde este cultivo comenzó a difundirse por todo el mundo (Sinavimo, 2022). Los trigos más utilizados comercialmente son el *Triticum durum* y *Triticum aestivum*. El primero, también llamado trigo duro, tiene como destino principal la elaboración de sémola para pastas. El segundo, por el contrario, se denomina trigo harinero, siendo este al que más superficie se le destina a nivel mundial y se utiliza para la elaboración de harina para pan (Yara, 2022).

La región triguera de Argentina ocupa una extensa área, que va desde la provincia de Buenos Aires hasta las provincias de Salta y Jujuy, con condiciones agroecológicas muy diversas (Sinavimo, 2022). La superficie sembrada en la campaña 2021/2022 fue de 6,9 millones de ha, logrando una producción de 22,1 millones de toneladas, con un rendimiento promedio de 33,6 qq ha⁻¹ (Bolsa de Cereales de Rosario, 2022). Por su parte, para la misma campaña, la provincia de Córdoba contribuyó con 1,2 millones de ha, las cuales presentaron un rendimiento promedio de 35,1 qq ha⁻¹ y una producción estimada total de 3,8 millones de tn (Bolsa de Cereales de Córdoba, 2022).

El agua y el nitrógeno son los principales factores que definen la producción de trigo (Martínez *et al.*, 2016). En condiciones de alta oferta hídrica como aquellas que se dan en situaciones bajo riego, el nitrógeno pasa a ser el principal determinante del rendimiento. La respuesta del rendimiento a medida que se incrementa la oferta de N sigue una relación de incrementos decrecientes, en donde la eficiencia de uso de N decrece a medida que aumenta la dosis de N. (Álvarez *et al.*, 2001). En este sentido, adecuar la oferta de N a los requerimientos del cultivo para maximizar el rendimiento es el principal objetivo de una nutrición balanceada.

Si la oferta de agua y de N son adecuadas, el factor que limitaría el rendimiento es la intercepción de luz, por lo que es necesario ajustar la densidad de siembra, según el cultivar y la zona de cultivo. De esta manera se puede influir sobre la cobertura del cultivo sobre el suelo, maximizando la radiación interceptada por parte del canopy (Mitchell, 1970). Este objetivo se logra cuando el cultivo alcanza el índice de área foliar (IAF) crítico, principalmente durante las etapas de mayor sensibilidad a cambios en las condiciones de crecimiento. Pero la respuesta del rendimiento al incremento de la densidad no es lineal. En cultivos con alta plasticidad vegetativa, como el trigo, existe un rango amplio de densidades que asegura el máximo rendimiento, dado que compensa a través de una mayor o menor diferenciación de estructuras vegetativas (Magrin y Senigaglia, 1981).

En gran parte de la región triguera del país, las precipitaciones son escasas durante el ciclo del cultivo, siendo esto una gran limitante en cuanto a la obtención de altos rendimientos. Por esto es de gran importancia que el cultivo comience su ciclo con una buena reserva hídrica en el perfil de suelo.

Por esta razón, es muy común que en búsqueda de altos rendimientos el cultivo se realice bajo riego, sobre todo en la provincia de Córdoba, logrando aumentos de hasta un 115%, respecto a una condición de secano (Todoagro, 2021). Además, el riego genera una menor variabilidad de los mismos a lo largo de los años (Todoagro, 2021). Es de destacar que una deficiencia hídrica durante el período de 20 días antes a 10 días después de la floración genera la mayor disminución del rendimiento, siendo esta etapa denominada período crítico (Satorre *et al.*, 2003).

A su vez el agua y el nitrógeno, interaccionan, ya que una correcta nutrición nitrogenada del cultivo genera un aumento de la eficiencia del uso del agua (EUA) dado que fomenta un mayor crecimiento, minimizando la evaporación y aumentando la transpiración (Micucci *et al.*, 2003).

Se plantean tres hipótesis. Como primera se plantea que, siendo la oferta hídrica igual para todos los tratamientos, se espera que la respuesta en rendimiento aumente ante dosis crecientes de nitrógeno hasta una dosis a partir de la cual comenzaría a disminuir el incremento marginal de rendimiento. Como segunda hipótesis se plantea que el aumento en las dosis de nitrógeno es acompañado de aumentos en la EUA. Una tercer hipótesis es que no se esperan diferencias significativas en rendimiento al variar la densidad de siembra, dado la plasticidad vegetativa que tiene el trigo.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el rendimiento del cultivo de trigo bajo riego, utilizando diferentes dosis de fertilizante nitrogenado y distintas densidades de siembra en un ambiente de la región central de la provincia de Córdoba.

Objetivos específicos

- a) Evaluar diferencias de porcentaje de cobertura del suelo (intercepción de radiación solar) entre tratamientos.
- b) Evaluar el rendimiento y sus componentes numéricos.
- c) Evaluar el consumo y la EUA de cada tratamiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se llevó a cabo en el establecimiento agrícola “El Rincón” en la localidad de Rincón, situada en el departamento de Río Segundo, Córdoba (31° 35' 16.1" S y 63° 37' 09.9" W). En cuanto a las características climáticas de la región, la temperatura máxima media anual es 23,5 °C, la temperatura mínima media anual es 12 °C, la temperatura media anual es 17,75 °C y la amplitud térmica media anual es 11,5 °C. La fecha media de las últimas heladas es el 1 de septiembre con un adelanto o retraso de 21 días, y la fecha media de las primeras heladas es el 26 de mayo con un adelanto o retraso de 17 días. Estas fechas nos dan un período medio libre de heladas de 263 días. En cuanto a las precipitaciones, la región tiene un régimen monzónico, siendo la media anual de 811 mm. (Weatherspark, 2022).

El suelo, es un Haplustol éntico con una capacidad de uso IIIc, es decir que las únicas limitantes son de carácter climáticas, y un índice de productividad de 68%.

El ensayo se sembró de acuerdo a un diseño experimental en parcelas subdivididas combinando tres densidades de siembra: 40; 90; y 140 kg ha⁻¹ con tres niveles de N aplicados en macollaje: 0; 100; y 200 kg N ha⁻¹. Se realizaron tres repeticiones. La parcela principal correspondió a la densidad y la subparcela al nivel de N (n=27). Cada unidad experimental fue de 6,84 m de ancho por 5 m de largo. La distancia entre surcos fue de 0,19 m.

El cultivo antecesor fue soja de primera cosechada a mediados de abril, con un rendimiento de 38 qq ha⁻¹. El 11/05 se realizó el barbecho químico con los siguientes productos: Glifosato - 1,5 litros ha⁻¹, Dicamba - 0,2 litros ha⁻¹, Clorsulfuron+Metsulfuron - 15 gramos ha⁻¹.

Para la siembra se utilizó semilla de trigo correspondiente al cultivar Algarrobo, de ciclo intermedio-largo, de la empresa Don Mario. Se sembró el 24/05 con una sembradora Giorgi D10 de 36 surcos. Las semillas se trataron con un insecticida (Imidacloprid; Neonicotinoide) y fungicida (Tebuconazole; Triazol).

Una semana después de la siembra, se realizó un muestreo de suelo en el cual se evaluó el agua total y los nutrientes disponibles. Para evaluar agua total se seleccionaron tres puntos al azar, dentro de cada una de las repeticiones de los ensayos y se extrajeron muestras cada 20 cm hasta los 2 metros de profundidad. Para transformar desde humedad gravimétrica a humedad volumétrica se utilizó una densidad aparente de 1,3 g cm⁻³. Para evaluar los nutrientes se realizó un solo pique del cual se extrajo una muestra de 0 a 20 cm y otra de 20 a 60 cm de profundidad.

El 24/06, se realizó un recuento de plantas logradas en cada unidad experimental, sobre una superficie de 1 m², para ello se contaron las plántulas emergidas en un surco de 5,26 metros lineales, con cinco repeticiones.

El 13/07 se aplicó urea (46% N). La forma de aplicación fue manual, al voleo. Respetando las dosis preestablecidas, se aplicaron el equivalente a 217 kg ha⁻¹ (N100) y 434 kg ha⁻¹ (N200) de urea, dejando el tratamiento N0 sin fertilizar. Luego de la aplicación de urea se regó.

Adicionalmente, como tratamientos complementarios, fuera del diseño mencionado anteriormente, se evaluó el efecto de un fertilizante arrancador aplicado a la siembra. La densidad en estos tratamientos fue de 110 kg ha⁻¹ y una fertilización de 46 kg N ha⁻¹ al macollaje. Se utilizó una dosis de 70 kg ha⁻¹ de MicroEssentials® SZ® el cual aportó 8,4 kg N ha⁻¹; 12,3 kg P ha⁻¹; 7 kg S ha⁻¹; 0,7 kg Zn ha⁻¹ la cual fue comparada con un testigo sin arrancador. Se realizaron tres repeticiones por tratamiento.

En el estado Z39 (Zadoks *et al.*, 1974), con la hoja bandera desplegada, se realizó una aplicación de 750 cc ha⁻¹ de un fungicida compuesto por Epoxiconazole (triazol) y Kresoxim-metil (estrobirulina).

En el estado Z60 (antesis) se realizó una determinación del % de intercepción de radiación solar utilizando la aplicación Canopeo (Canopeo, 2022) en cada unidad experimental.

Veinte días antes de antesis, se realizó un muestreo de materia seca aérea (PS_{ini}) en cada unidad experimental. Para esto se cortaron las plantas al ras del suelo en 5 surcos por 0,5 metros de largo. A los diez días después de antesis, se realizó el mismo procedimiento mencionado anteriormente para evaluar nuevamente la biomasa del cultivo (PS_{fin}), pero esta vez en cada parcela se tomaron 5 surcos por 0,8 m de largo. Luego de la madurez fisiológica del cultivo se realizó el último corte de plantas, tomando en este caso 5 surcos por 1 metro de largo, para evaluar materia seca a cosecha (PS_{mad}). El material vegetal en cada momento de muestreo se secó en una cámara con aire forzado a 60 °C.

La tasa de crecimiento del cultivo (TCC), se calculó como la relación entre la diferencia de PS_{fin} y PS_{ini} y los días transcurridos entre ambos muestreos.

El peso seco de las espigas (PESP) se determinó a partir de una submuestra de 25 tallos al azar del muestreo PS_{fin}. Las espigas fueron separadas de los tallos, secadas y pesadas. La tasa de crecimiento de las espigas (TCE) se calculó como la relación entre PESP por la cantidad de días transcurridos entre PS_{ini} y PS_{fin}. Se consideró que el peso seco de las espigas en PS_{ini} fue despreciable de acuerdo a lo establecido por Abbate (1997).

La partición del crecimiento hacia las espigas (Part), se calculó como la relación entre TCE y TCC.

Por otra parte, cada muestra de PS_{mad} , fue trillada, con una trilladora estática, y los granos se pre limpiaron para eliminar restos de materia vegetal. Se pesaron los granos de cada muestra, y el rendimiento (RTO) fue expresado al 0% de humedad.

El PG se obtuvo a partir de una submuestra de 200 granos al azar. El NG fue obtenido como la relación entre RTO y PG. Además, se calculó el índice de cosecha (IC), como la relación entre RTO y el PS_{mad} .

El agua total luego de la cosecha se determinó, en dos repeticiones por tratamiento, mediante el método gravimétrico, hasta los 2 m de profundidad, fraccionado cada 20 cm. Se utilizó una densidad aparente estimada de $1,3 \text{ g cm}^{-3}$.

El consumo total de agua (C) para cada tratamiento fue calculado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Consumo} = (\text{ATI} + \text{PPef} + \text{R}) - \text{ATF}$$

Donde: ATI, ATF, R y PPef son el agua total al inicio (siembra), el agua total al final (madurez), el agua aportada por riego y la precipitación efectiva, respectivamente.

El agua aportada mediante el riego y las precipitaciones menores a 15 mm se consideraron 100% efectivas, mientras que las precipitaciones mayores a 15 mm fueron transformadas en precipitaciones efectivas siguiendo la ecuación dada por Dardanelli *et al.* (1992):

$$\text{Si } PP > 15\text{mm}; \text{PPef} = 2,43 * PP^{0.667}$$

Donde: PP es la precipitación diaria.

La eficiencia de uso del agua (EUA_{RTO} ; kg mm^{-1}) se calculó como la relación entre rendimiento expresado en kg ha^{-1} y el consumo en mm.

Los datos obtenidos fueron analizados estadísticamente mediante ANAVA, y cuando se detectaron diferencias significativas ($p < 0,05$) las medias se compararon a través de la diferencia mínima significativa de Fisher utilizando el software estadístico InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2019).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización edáfica y meteorológica del sitio experimental

Tabla 1. Análisis de Suelo. Fuente: Laboratorio Villa del Rosario

DETERMINACIONES	Profundidad	
	0-20 cm	20-60 cm
pH	6,87	7,25
Conductividad eléctrica (mS/cm)	0,3	0,43
Materia orgánica %	1,95	----
Nitratos (ppm)	42	37
Nitrógeno de nitratos (ppm)	9,5	8,5
Sulfatos (ppm)	18	24
Azufre de sulfatos (ppm)	6	3,8
Fósforo extraíble PBray (ppm)	4,5	8

En la Tabla 1 se puede ver el análisis de suelo. En el mismo se observa que, de 0 a 20 cm de profundidad, la disponibilidad de P Bray está por debajo del umbral crítico para el cultivo, que según Satorre (2003) es de 12 a 15 ppm. También se extrae que la disponibilidad de N en forma de nitratos es de 69 kg ha⁻¹ de 0 a 60 cm de profundidad.

Respecto al agua en el perfil al momento de la siembra, el agua total fue de 402 mm hasta los 2 metros de profundidad, y el agua útil fue de 193 mm para la misma profundidad.

Tabla 2. Caracterización meteorológica mensual de la campaña 2021. Radiación global (RG), temperatura media (Tmed), cociente fototérmico (Q), temperatura mínima (Tmín), temperatura máxima (Tmáx) y precipitación (PP), precipitación efectiva (PPef), evapotranspiración de referencia (ET0), Riego.

VARIABLES	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov
RG (Mj/m ²)	12,4	9,1	11,8	15,1	17,2	23,6	23,8
Tmed (°C)	12,2	10,2	10,2	12,2	16,2	19,1	20,8
Q (M/m ² /d/°C)	0,8	0,8	1,0	1,0	0,7	0,8	0,7
Tmín (°C)	2,5	4,0	2,0	3,2	9,1	10,0	12,9
Tmáx (°C)	23,6	17,9	20,0	22,8	24,5	28,9	29,4
Riego (mm)	15	15	55	85	125	75	0
PP (mm)	0	10	0	0	8	28	102
PPef (mm)	0	10	0	0	8	27	78
ET0 (mm)	2,2	1,7	2,2	3,2	4,0	5,7	5,8

La caracterización climática se resume en la Tabla 2.

La temperatura media es menor en todos los meses, comparado con el periodo comprendido entre 1959-2009, excepto en Septiembre y en Octubre.

Por otra parte, la radiación global (RG) es mayor en todos los meses comprendidos durante el desarrollo del cultivo, comparado con el mismo periodo nombrado anteriormente.

El cociente fototermal (Q), es el resultado de la relación entre la radiación solar (RG*0,5) y la temperatura media (Tmed) menos la temperatura base del trigo 4,5 °C. Con mayores valores de Q mejor ambiente productivo tiene el cultivo (Ferreira, 2022). Por lo que en este caso el ambiente fue mejor que el promedio histórico para todos los meses, menos para Septiembre, mes en el cual comenzó el periodo de definición del NG.

Las precipitaciones en todos los meses excepto junio, ocurrieron en menor medida que el promedio histórico para la zona. Se destaca que en mayo, julio y agosto no ocurrieron precipitaciones.

Además, se detallan los milímetros de agua regados cada mes. En mayo, se regaron 15 mm para lograr buena humedad de siembra. A partir de julio, el milimetraje regado por mes aumentó hasta septiembre para que haya buena disponibilidad hídrica durante el período crítico del cultivo.

Densidades logradas

Las densidades de siembra obtenidas fueron 138, 245 y 342 plantas m⁻² para las dosificaciones de 40, 90 y 140 kg de semilla por hectárea respectivamente.

En los tratamientos complementarios se lograron 292 plantas m⁻² con 110 kg de semilla por hectárea.

Como referencia, para las fechas de siembras tempranas y en la zona donde se realizó el ensayo, se utilizan densidades de entre 150-200 plantas m⁻².

Periodo crítico

En la Tabla 3 se presentan los resultados de las variables medidas durante el transcurso del período crítico del cultivo para los distintos tratamientos evaluados.

Tabla 3. Resultados durante período crítico. Donde PS_{ini} = Materia seca aérea antes del periodo crítico; PS_{fin} = Materia seca aérea luego del periodo crítico; PESP= Peso de la espiga, TCC = Tasa de crecimiento del cultivo, TCE = Tasa de crecimiento de la espiga; Part = Partición de asimilados hacia la espiga; FI= % de intercepción de la radiación.

Densidad (D)	Nivel (N)	PS _{ini}	PS _{fin}	PESP	TCC	TCE	Part	FI
----- (kg ha ⁻¹) -----		----- (g m ⁻²) -----			— (g m ⁻² d ⁻¹) —		(%)	(%)
40	---	142 b	536 a	134 a	15.8 a	5,4 a	34,2 a	68 b
90	---	209 b	590 a	129 a	15.3 a	5,2 a	34,2 a	72 a
140	---	303 a	762 a	164 a	18,4 a	6,6 a	35,7 a	76 a
---	0	183 b	508 c	111 b	13,0 b	4,4 b	34,4 b	56 c
---	100	206 b	641 b	135 b	17,4 a	5,4 b	31,3 b	75 b
---	200	265 a	739 a	181 a	19,0 a	7,2 a	38.5 a	85 a
D × N		ns	ns	ns	ns	Ns	ns	ns
Datos complementarios								
Sin arrancador		163 b	494 b	96 b	13,3 b	3,8 b	29,2 b	67 b
Con arrancador		391 a	789 a	169 a	15,9 a	6,8 a	42,7 a	80 a

Letras distintas indican diferencias significativas (p<0,05); ns = diferencias no significativas.

En la Tabla 3 se observa que para ninguna de las variables evaluadas hubo interacción significativa entre la densidad de siembra y el nivel de N. Por esto, las variables se analizaron primero según densidad y luego según el nivel de N.

Al variar la densidad de siembra, el tratamiento de 140 kg ha⁻¹ obtuvo un PS_{ini} 73% mayor que los tratamientos de 90 y 40 kg ha⁻¹. En las siguientes mediciones de biomasa aérea, PS_{fin}, PS_{mad} y PESP, no se observaron diferencias significativas entre densidades.

Según el nivel de N, el tratamiento N200, fue significativamente superior, ya que logró un PS_{ini} 36% mayor que el promedio de N0 y N100.

En lo que respecta a la variable PS_{fin}, N200 tuvo diferencias significativas con respecto al resto de tratamientos. Este tratamiento obtuvo un PS_{fin} 15% mayor que N100 y éste último un valor de PS_{fin} 26% mayor que N0, siendo esta diferencia significativa.

Con respecto a los valores PESP, en función de la dosis de nitrógeno, este se incrementó en un 47% en N200 con respecto a los otros dos tratamientos.

La TCC, muestra valores sin diferencias significativas entre los tratamientos de densidad. La misma variable, analizada en los tratamientos de N muestra diferencias significativas entre la aplicación o no del mismo. Se observa que los resultados de N100 y N200 tienen diferencias significativas con respecto a N0, siendo los mismos un 40% superiores a este último. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Brown *et al.* (1987) donde se reporta que la fertilización nitrogenada en los trigos genera una mayor TCC, desde encañazón hasta madurez fisiológica, que los cultivos no fertilizados.

La TCE, sólo mostró diferencias significativas para la dosis mayor de N, siendo esta variable un 47% superior al promedio de las de N0 y N100 (Tabla 3).

La relación entre TCE y TCC, expresada como Part (%), no varió significativamente al modificar las densidades. Pero con respecto a las dosis de nitrógeno se observa que el tratamiento de N200 fue un 17% mayor que N0 y N100.

La FI en antesis fue un 9% mayor para las densidades de 90 y 140 kg ha⁻¹ de semilla, comparado a 40 kg ha⁻¹. Respecto a los niveles de N la mayor cobertura se logró en el tratamiento N200, siendo un 52% mayor que el tratamiento N0 y 13% mayor que N100. Esto último coincide con los resultados de Zhang *et al.* (1998) y Ferraris (2009), que al aumentar la fertilización nitrogenada obtuvieron un mayor IAF y por lo tanto un aumento en el % de radiación interceptada por el cultivo.

En la Tabla 3, también se detallan los resultados del ensayo complementario, donde se evaluó el efecto de un arrancador.

Considerando que el principal aporte del arrancador es P, y teniendo en cuenta la deficiencia de PBray vista en el análisis de suelo, el tratamiento con arrancador generó diferencias positivas en todas las variables, siendo estas significativas. El PS_{ini} fue un 140% mayor, coincidiendo con

lo evidenciado por Covacevich *et al.* (1998) y Ferraris (2015) quienes encontraron que el cultivo de trigo ante deficiencias de P, produjo un mayor peso seco aéreo en preantesis con el aporte de fósforo a la siembra. El PS_{fin} resultó mayor en un 60%. En la variable PESP se obtuvo un valor 76% más alto. Con respecto a la TCC un valor 20% superior. La TCE es un 79% mayor. En la variable partición hay una diferencia de un 46% entre la aplicación del arrancador y el testigo. También es de destacar que FI varió significativamente, siendo el valor con arrancador un 19% superior, observándose esto mismo en el ensayo realizado por Ferraris (2015) en el que con la aplicación de 80 kg ha^{-1} de arrancador (aportando aproximadamente 8 kg P ha^{-1}), FI aumentó en un 10% comparado con el testigo.

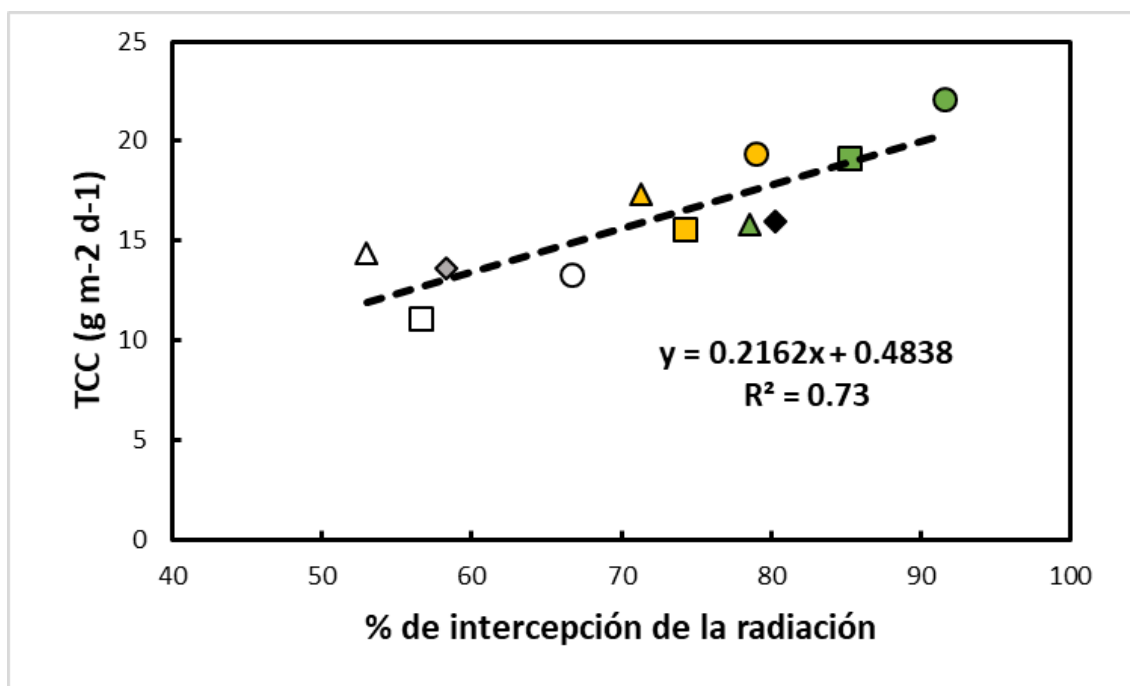


Figura 1. Relación entre la TCC de cada tratamiento y el % de intercepción de radiación solar. Símbolos en la figura: Triángulos, cuadrados y círculos corresponden a las densidades de 40, 90 y 140 kg ha^{-1} . El relleno blanco, amarillo y verde corresponde a las dosis de 0, 100 y 200 kg N ha^{-1} . Rombo gris sin arrancador y rombo negro con arrancador.

En este experimento se encontró una buena asociación (R^2 de 0,73) entre la TCC durante el período crítico, y FI (Figura 1).

Rendimiento

Tabla 4. Resultados de rendimiento. Donde: PS_{mad}= Biomasa aérea a cosecha; RTO= Rendimiento con 0% de humedad; NG= Número de granos; PG= Peso de Granos; IC= Índice de cosecha; C= consumo de agua; EU_{ARTO}= Eficiencia en el uso de agua para formar kg de trigo.

Densidad (D) ----- (kg ha ⁻¹) -----	Nivel (N) -----	PS _{mad} ---- (g m ⁻²) ----	RTO	NG (# m ⁻²)	PG (mg)	IC (%)	C (mm)	EU _{ARTO} (kg mm ⁻¹)
40	---	797 a	309 b	9477 b	32,6 a	39,0 a	569 a	5,3 b
90	---	958 a	371 a	11445 a	32,6 a	39,0 a	570 a	6,6 a
140	---	975 a	370 a	11304 a	32,9 a	38,1 a	569 a	7,1 a
---	0	755 c	295 b	8956 c	33,0 a	39,2 a	534 c	5,5 b
---	100	932 b	363 a	10977 b	33,1 a	39,2 a	575 b	6,8 a
---	200	1043 a	394 a	12293 a	32,1 a	37,7 a	599 a	6,7 a
D × N		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Datos complementarios								
Sin arrancador		861 b	323 b	9704 b	33,3 a	37,5 a	586 a	5,6 b
Con arrancador		1171 a	416 a	13218 a	31,5 b	35,5 a	581 a	6,7 a

Letras distintas indican diferencias significativas (p<0,05); ns = diferencias no significativas.

Se observa en la Tabla 4, que para ninguna de las variables hubo interacción significativa entre la densidad de siembra y el nivel de N. Debido a esto, las variables se analizaron separadas por densidad y luego por nivel de N.

El PS_{mad} no fue afectado por la densidad, en cambio los tres tratamientos de fertilización tuvieron diferencias significativas entre ellos. El tratamiento N200 obtuvo un PS_{mad} 12% mayor que N100 y 38% mayor que N0.

En la Tabla 4 también se pueden observar los resultados del ensayo complementario, en donde PS_{mad} del tratamiento con el arrancador fue un 36% mayor con respecto al tratamiento sin arrancador.

El RTO en las densidades de siembra de 90 y 140 kg ha⁻¹ resultó significativamente superior, en un 20%, con respecto al tratamiento de 40 kg ha⁻¹. Difiriendo con Ventimiglia *et al.* (2015), que plantean que no hay diferencia significativa entre 140 y 240 plantas m⁻², lo que equivale a la cantidad de plantas m⁻² obtenidas en nuestro tratamiento de 40 y 90 kg ha⁻¹ respectivamente. De

esta manera se puede ver que ambos resultados demuestran la plasticidad del cultivo de trigo, pudiendo obtener el mismo rendimiento con una amplia gama de densidades de siembra. Sin embargo, esta capacidad de compensación tiene un límite, el cual lo podemos observar en los resultados de la densidad de siembra de 40 kg ha⁻¹ donde el rendimiento de esta fue significativamente inferior al resto. Según lo aseverado por Allemandi *et al.* (2018), la compensación está dada por la capacidad de macollaje que tiene el cultivo de trigo, existiendo una relación inversa entre macollos por planta y la densidad de siembra.

No se encontraron diferencias significativas en RTO entre N200 y N100, pero el promedio de estos tratamientos fue un 28% más alto que N0 (Tabla 4).

De acuerdo a los precios actuales de la urea y el trigo, se necesitan aproximadamente 5,3 kg de trigo para pagar un kg de N. Observando los datos de rendimiento, si se calcula eficiencia de uso del N entre los tratamientos N100 y N200, como la relación entre la diferencia de rendimiento obtenido (rendimiento corregido a la humedad de comercialización) de N100 y N200 con el tratamiento N0, esta es de aproximadamente 8 y 6 kg ha⁻¹ de grano por kg de N aplicado. Estos valores sugieren una respuesta económica positiva mayor para el tratamiento N100.

Por su parte el RTO obtenido en el tratamiento con arrancador fue un 29% mayor que el tratamiento sin arrancador. Siguiendo la misma tendencia que lo reportado por Ferraris (2015). En este caso, considerando la eficiencia de uso de P, se lograron aproximadamente 90 kg ha⁻¹ de grano por kg de P aplicado. Este valor sugiere un alto retorno económico para la práctica de fertilización fosforada en este tipo de ambientes, puesto que en relación a los precios del fertilizante y del grano de trigo se necesitarían 20 kg de grano para pagar un kg de P.

Las densidades de siembra de 90 y 140 kg ha⁻¹ tuvieron un 20% más de granos (NG) con respecto a la densidad de 40 kg ha⁻¹, siendo esta diferencia significativa. Esto no coincide con lo aseverado por Gasparotto (2014), quién encontró que al aumentar la densidad de 180 a 300 plantas m⁻² disminuye significativamente el NG m⁻².

Respecto al nivel de N, NG se incrementó significativamente a medida que aumentó la dosis de N. El tratamiento N200 logró un 12% más que N100 y un 37% más que N0. A su vez el tratamiento con arrancador obtuvo un NG significativamente superior que el tratamiento sin arrancador, formando un 36% más de granos m⁻². Ferraris (2015) obtuvo resultados similares a los encontrados en este trabajo, donde con la aplicación de una dosis de arrancador equivalente a la utilizada en nuestro ensayo el autor logró incrementar el NG en un 32% con respecto al testigo.

En relación al PG, no se encontraron diferencias significativas entre los distintos tratamientos de densidad de siembra y nivel de N. Por el contrario, se observó una reducción significativa en PG ante la aplicación del arrancador. Esta última respuesta puede haber sido el producto de una

mayor limitación de fuente para el llenado de los granos dada la más alta fijación de granos al aplicar el arrancador. De todas maneras, las diferencias en PG con y sin arrancador fueron bajas y cercanas al 5% (Tabla 4).

Se estableció una mejor asociación del RTO con NG que con PG (Figura 1 y Figura 2), lo cual destaca a NG como el principal determinante del rendimiento.

El NG explica en gran medida la variación de rendimiento, teniendo su relación un R^2 de 0,98. Por el contrario, la relación entre el RTO y PG tiene un R^2 de 0,19, por lo que la influencia del PG en el rendimiento es insignificante. Coincidiendo con lo afirmado por Abbate *et al.* (1995) y Ferraris (2015) quienes encontraron una relación positiva significativa entre rendimiento y NG, pero no encontraron correlación entre rendimiento y PG.

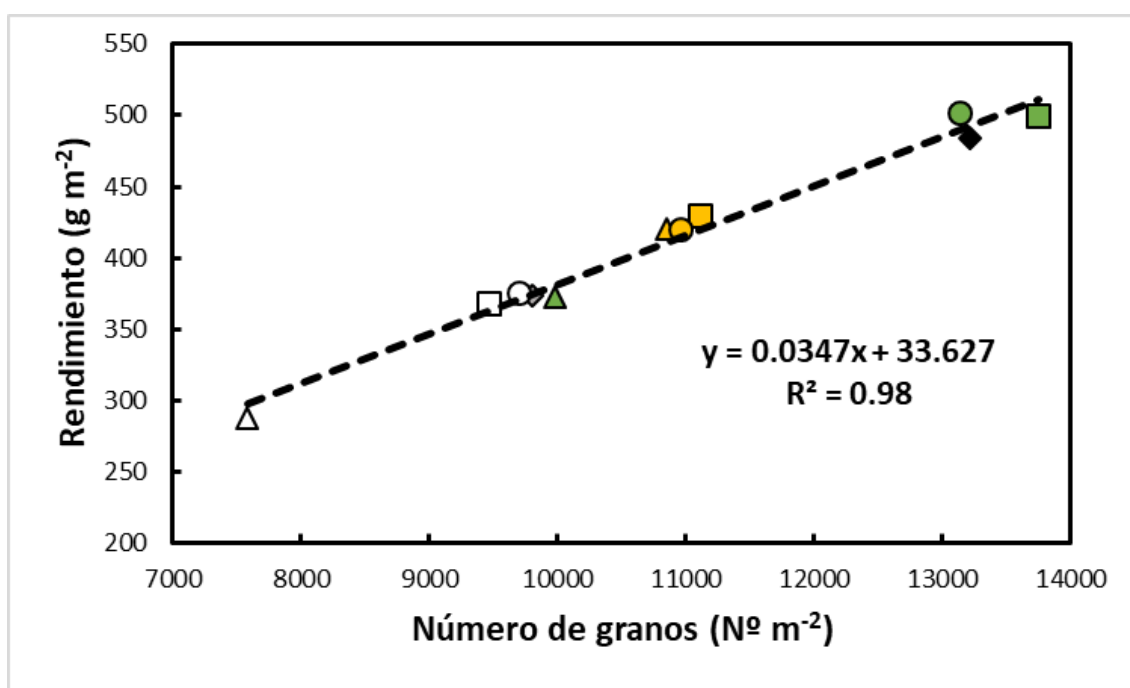


Figura 2. Relación lineal entre NG y RTO. Símbolos en la figura: Triángulos, cuadrados y círculos corresponden a las densidades de 40, 90 y 140 kg ha⁻¹. El relleno blanco, amarillo y verde corresponde a las dosis de 0, 100 y 200 kg N ha⁻¹. Rombo gris sin arrancador y rombo negro con arrancador.

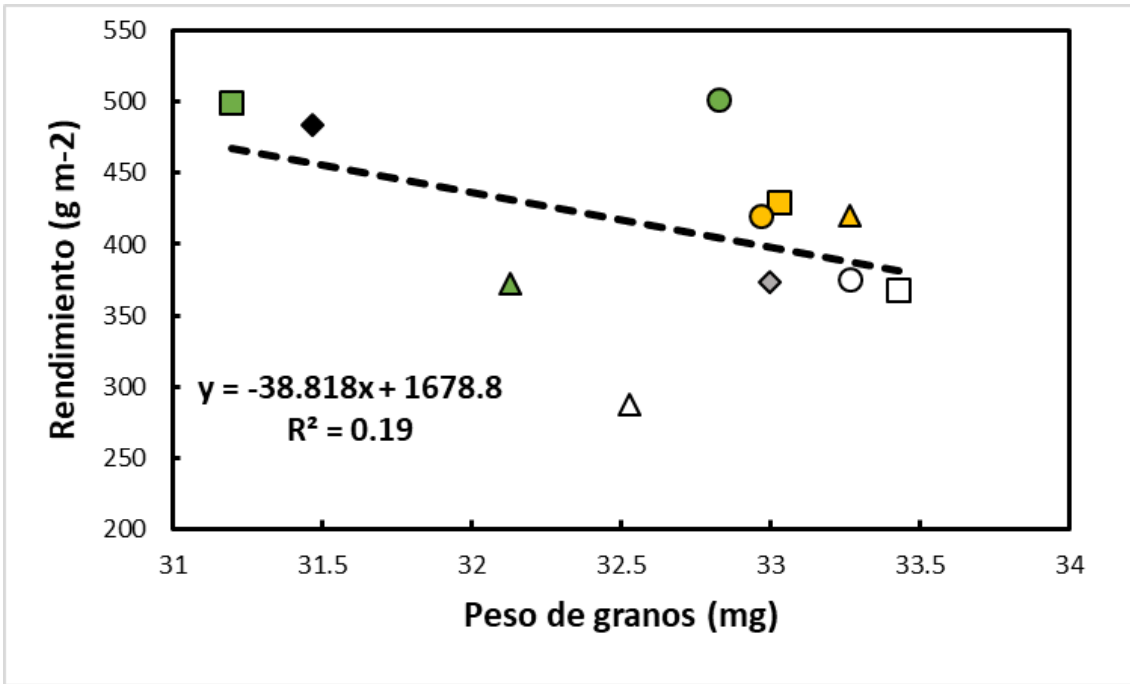


Figura 3. Relación lineal entre PG y RTO. Símbolos en la figura: Triángulos, cuadrados y círculos corresponden a las densidades de 40, 90 y 140 kg ha⁻¹. El relleno blanco, amarillo y verde corresponde a las dosis de 0, 100 y 200 kg N ha⁻¹. Rombo gris sin arrancador y rombo negro con arrancador.

En la Figura 4, se destaca la relación entre el % de intercepción de la radiación en antesis con el NG de cada tratamiento. Se observa una relación lineal entre ambas variables con un R² de 0,76. El principal componente del rendimiento, el NG se define durante el período crítico, por lo que un mayor % de intercepción de la radiación en este período genera un aumento en el PESP, y por lo tanto mayor NG.

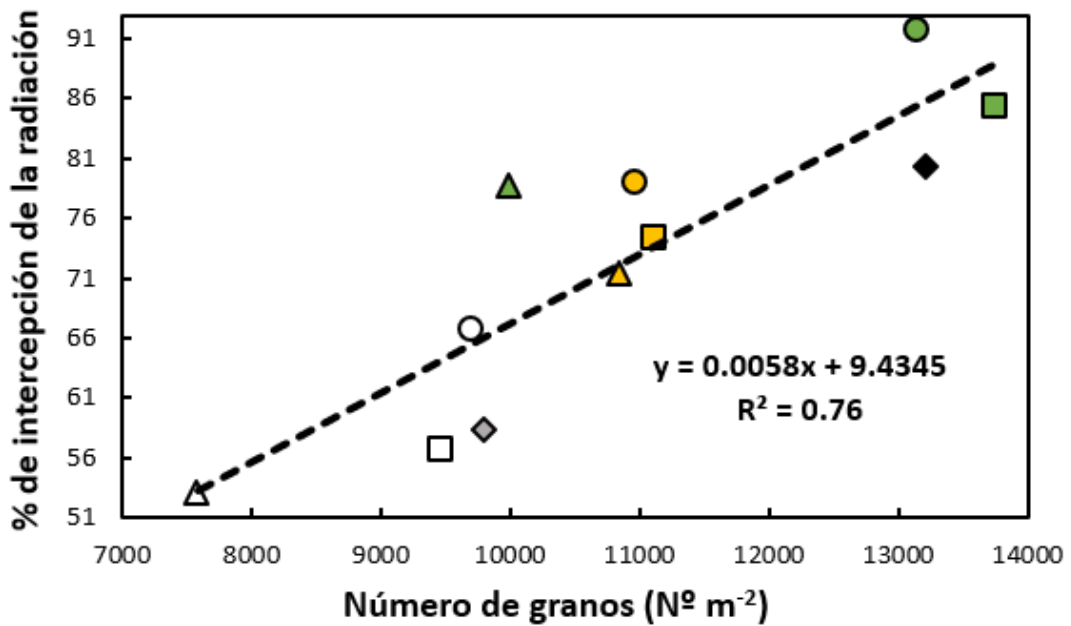


Figura 4. Relación lineal entre NG y el % de intercepción de radiación solar. Símbolos en la figura: Triángulos, cuadrados y círculos corresponden a las densidades de 40, 90 y 140 kg ha⁻¹. El relleno blanco, amarillo y verde corresponde a las dosis de 0, 100 y 200 kg N ha⁻¹. Rombo gris sin arrancador y rombo negro con arrancador.

Es de destacar que no hubo diferencias significativas de IC entre ninguno de los tratamientos en estudio.

Consumo y eficiencia de uso del agua

Los valores de consumo de agua estuvieron cercanos a los obtenidos por Giupponi (2020) para un ambiente como el de la región central de Córdoba. La densidad de siembra no generó efectos significativos sobre esta variable. Por su parte, se encontró un efecto significativo sobre el consumo de agua al variar el nivel de N. El tratamiento N200 consumió un 4% más de agua que N100 y este un 8% más que N0.

Respecto a la EUA_{RTO} , como se observa en la Tabla 4, los tratamientos de 90 kg ha⁻¹ y de 140 kg ha⁻¹ tuvieron diferencias significativas con la densidad de 40 kg ha⁻¹, logrando una EUA_{RTO} 29% mayor. En cuanto a las dosis de nitrógeno, la EUA_{RTO} fue mayor para N200 y N100 respecto a N0. Esta diferencia fue de un 23%, a favor de los tratamientos fertilizados. Esto coincide con lo reportado por Cooper *et al.* (1987) y Zhang *et al.* (1998) donde la fertilización nitrogenada tuvo un efecto positivo sobre la EUA_{RTO} .

Por último, la EUA_{RTO} del tratamiento con arrancador fue significativamente superior que la del tratamiento sin arrancador, siendo la diferencia del 20%.

CONCLUSIONES

En este trabajo el cultivo se desarrolló bajo riego y todos los tratamientos estuvieron bajo las mismas condiciones hídricas.

Se destaca la importancia de las condiciones en las cuales el cultivo atraviesa el periodo crítico, ya que en este se define el NG, principal determinante del RTO. Por esto es que en el trabajo se analizaron variables durante dicho periodo, para ver cómo los cambios en densidad y fertilización influyen en la respuesta del cultivo.

Con el aumento de la fertilización nitrogenada se logró un aumento en el % de intercepción de la radiación, generando un aumento en la TCC durante el periodo crítico y un aumento en la TCE, acumulando una mayor biomasa en las mismas. Este aumento en la TCE durante el período crítico generó un mayor NG, por lo que también incrementó el rendimiento. Esto se observó al pasar de N0 a N100, pero no varió significativamente al pasar a N200, coincidiendo esto con lo dicho en la hipótesis 1. Además, al aumentar las dosis de nitrógeno aumenta el consumo de agua por parte del cultivo. Pero al relacionar dicho consumo con el rendimiento, la EUA_{RTO} incrementa de N0 a N100, pero no lo hace al pasar de N100 a N200. Por esto es que podemos decir que la hipótesis 2 es parcialmente verdadera, ya que solo mejora hasta N100. En este ensayo con N100 se obtuvieron 68 g m^{-2} adicionales y la EUA_{RTO} aumentó $1,3 \text{ kg mm}^{-1}$, siendo esta la dosis óptima. Para conocer dicha dosis, hay que tener en cuenta la disponibilidad inicial de nitrógeno en el suelo, siendo muy importante el análisis del mismo.

Al variar las densidades de siembra, no se vió respuesta en el RTO, si comparamos las dos densidades mayores. Pero si se ve variación si comparamos estas con la menor densidad, contradiciendo esto a la hipótesis 3. Esto es explicado ya que al pasar de 40 a 90 kg ha^{-1} el NG aumenta, pero entre 90 y 140 kg ha^{-1} este no varía. Por esto se resalta que el máximo rendimiento se puede lograr con un rango amplio de densidades.

Con respecto al otro componente numérico del rendimiento, el PG, se observó que es insignificante en la definición del rendimiento, ya que los tratamientos con menor NG, no lo logran compensar con el aumento del PG.

Particularmente en este ensayo, ante la baja disponibilidad de P Bray expresada en el análisis de suelo, se observó el efecto positivo que tuvo la incorporación del arrancador a la siembra en el crecimiento y desarrollo del cultivo, generando diferencias significativas en todas las variables evaluadas menos en Consumo e IC. Además, la baja disponibilidad de P Bray disminuyó la respuesta en al agregado de N, generando un techo de rendimiento, ya que es la principal limitante. En consecuencia, se recomienda para ensayos futuros incorporar dicho arrancador en todos los

tratamientos y observar la interacción de éste con los cambios en la dosis de fertilización nitrogenada y densidad de siembra en las mismas variables analizadas aquí.

Por último, se destaca la importancia de realizar estudios como este, ya que brindan información local para lograr un manejo racional de los recursos, acorde a las disponibilidades del lote y así obtener los mejores resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbate, P. E., Andrade, F. H., & Culot, J. P. 1995. The effects of radiation and nitrogen on number of grains in wheat. *The Journal of Agricultural Science*, 124(3), 351-360.
- Abbate, P. E., Andrade, F. H., Culot, J. P., & Bindraban, P. S. (1997). Grain yield in wheat: effects of radiation during spike growth period. *Field Crops Research*, 54(2-3), 245-257.
- Allemandi, E., & Capozzi, E. 2018. Evaluación del efecto de distintas densidades de siembra sobre los componentes del rendimiento del cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.).
- Alvarez R., Steinbach, H.S., Grigera, S., García, R. 2001. Disponibilidad de nitrógeno y rendimiento de trigo en la Pampa Ondulada. *Fertilizar*, 22: 6-
- Bolsa de Cereales de Córdoba. Disponible en: <https://www.bccba.org.ar/informes/cordoba-la-produccion-de-la-campana-invernal-2021-22-habria-superado-a-la-campana-precedente/>. Activo en Abril 2022.
- Bolsa de Cereales de Rosario. Disponible en: <https://www.bcr.com.ar/es/mercados/gea/estimaciones-nacionales-de-produccion/estimaciones>. Activo en Abril 2022.
- Brown, S. C., Keatinge, J. D. H., Gregory, P. J., & Cooper, P. J. M. 1987. Effects of fertilizer, variety and location on barley production under rainfed conditions in Northern Syria 1. Root and shoot growth. *Field Crops Research*, 16(1), 53-66.
- Canopeo. Disponible en: <http://www.canopeoapp.com/>. Activo en Abril 2022.
- Cooper, P. J. M., Gregory, P. J., Keatinge, J. D. H., & Brown, S. C. 1987. Effects of fertilizer, variety and location on barley production under rainfed conditions in Northern Syria 2. Soil water dynamics and crop water use. *Field Crops Research*, 16(1), 67-84.
- Covacevich, F., Echeverria, H. E., & Aguirrezabal, L. A. 1998. Influencia del fósforo sobre el crecimiento aéreo y radical de plantas de trigo. *Ciencia del suelo*, 16, 94-98.
- Dardanelli, J; De la Casa, AC; Ateca, MR; Zanvetor, R; Nuñez Vazquez, F; Salas, HP. 1992. Validación del balance hidrológico versátil para la sucesión sorgo-soja bajo dos sistemas de labranza. *Rev. Agr. de Manfredi y Marcos Juárez, Argentina*, 7: 20- 29
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M y Robledo C.W. InfoStat versión 2019. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

Ferraris, G. N. 2009. Fertilización nitrogenada de trigo y otros cereales de invierno. Criterios de manejo para incrementar su eficiencia. Proyecto Regional Agrícola-CERBAN. Área de Desarrollo Rural INTA EEA Pergamino.

Ferraris, G. 2015. Evaluación de una arrancador líquido fósforo-azufrado en colocación localizada en trigo: caracterización de su comportamiento agronómico. INTA EEA PERGAMINO.

Ferreira, M. L. 2022. Evaluación agronómica de cultivares de trigo en Manfredi. Campaña 2021. EEA Manfredi, INTA.

Gasparotto, G. 2014. Respuesta agronómica en trigo a diferentes densidades de siembra en lotes con ondulaciones. Universidad Nacional de Córdoba. Tomado de: <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/1732/Gasparotto%20-%20Respuesta%20agron%C3%B3mica%20en%20trigo%20a%20diferentes%20densidades..%20%20.pdf?sequence=1>

Giupponi, J. R. (2020). Consumo y eficiencia de uso del agua ante cambios de la oferta hídrica y de nitrógeno en dos cultivares de trigo en el centro de Córdoba. Universidad Nacional de Córdoba. Tomado de: <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/16464/Giupponi,%20Jos%C3%A9%20Ra%C3%BA%20-%20Consumo%20y%20eficiencia%20de%20uso%20del%20agua%20ante%20cambios%20de%20la%20oferta%20h%C3%ADrica%20y%20de%20nitr%C3%B3geno%20en%20dos%20cultivares%20de%20trigo%20en%20el%20centro%20de%20C%C3%B3rdoba.pdf?sequence=1>

Magrin, G., & Senigaglia, C. (1981). Variations in seeding rate and weed infestations, and their effects on yield *Triticum* spp. *Carpeta de Produccion Vegetal. Trigo (Argentina)*. v. 3 (26).

Martínez, J. M., Galantini, J. A., Landriacini, M. R., López, F. M., & Duval, M. E. 2016. Fertilización nitrogenada en trigo de la región subhúmeda: eficiencia del uso del agua y nitrógeno. *Ciencia del suelo*, 34(1), 81-92.

Micucci, F., Taboada, M. y Gil, R. 2003. El agua en los cultivos extensivos II: Consumo y eficiencia de uso del agua de los cultivos. *Archivo agronómico* N° 7. *Informaciones Agronómicas* N° 17. INPOFOS Cono Sur, Argentina.

Mitchell, R. L., 1970. *Crop growth and culture*. The Iowa State University Press, pag. 103- 125.

Satorre, E. H., Benech, R., Slafer, G. A., De la Fuente, E. B., Miralles, D. J., Otegui, M. E., & Savin, R. 2003. *Producción de granos: bases funcionales para su manejo*. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Buenos Aires, Argentina.

Sinavimo. Disponible en: <https://www.sinavimo.gob.ar/cultivo/triticum-aestivum>. Activo en Abril 2022.

Todoagro. 2021. Ensayos del INTA destacan los rendimientos de trigo, soja y maíz con riego suplementario: <https://www.todoagro.com.ar/ensayos-del-inta-destacan-los-rendimientos-de-trigo-soja-y-maiz-con-riego-suplementario/>

Ventimiglia, L. A., & Torrens Baudrix, L. 2015. Trigo. Efecto de la densidad de siembra sobre el comportamiento de variedades de ciclo largo y corto.

Weatherspark. Clima promedio en Villa del Rosario, Argentina. Disponible en: <https://es.weatherspark.com/y/28312/Clima-promedio-en-Villa-del-Rosario-Argentina-durante-todo-el-a%C3%B1o>. Activo en Abril 2022.

Weatherspark. Clima promedio en Pilar, Argentina. Disponible en: <https://es.weatherspark.com/y/28318/Clima-promedio-en-Pilar-Argentina-durante-todo-el-a%C3%B1o>

Yara. Disponible en: <https://www.yara.com.ar/nutricion-vegetal/trigo/tipos-de-trigo/>. Activo en Abril 2022.

Zadoks, J. C., Chang, T. T., & Konzak, C. F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed research*, 14(6), 415-421.

Zhang, H., Oweis, T. Y., Garabet, S., & Pala, M. 1998. Water-use efficiency and transpiration efficiency of wheat under rain-fed conditions and supplemental irrigation in a Mediterranean-type environment. *Plant and Soil*, 201(2), 295-305.

ANEXO



