



EVALUACIÓN DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA CONTÍNUA EN TRIGO BAJO SIEMBRA DIRECTA

Autor: José Nabaes

Tutor: Dr. Juan Manuel Martínez

Consejeros: Mag. Roberto J. Kiessling

Mag. Gabriela V. Minoldo

Departamento de Agronomía

Universidad Nacional del Sur

Bahía Blanca, Abril 2021

El presente trabajo surgió de un Convenio entre la Universidad Nacional del Sur y PROFERTIL S.A.



Agradecimientos

A mi tutor, Dr. Juan Manuel Martínez por su enorme predisposición en todo momento, su tiempo dedicado a brindarme ayuda y por su enseñanza tan valiosa en esta etapa final de la carrera.

A toda mi familia y en especial a mis padres, Graciela y Oscar, mis hermanos, Gonzalo y Micaela y mi abuela Maruca por su apoyo incondicional durante todos estos años, porque sin ellos no podría haber logrado este objetivo.

A mi novia Juliana que me apoyó en todo momento y que se alegraba por cada logro que obtenía y a toda su familia por el apoyo que me brindaron en todo este tiempo.

A mis amigos de la infancia que siempre estuvieron apoyándome para seguir ya sea en los momentos malos o buenos, y a los compañeros que conocí en la carrera.

A Andrés Hernandorena que pasamos muchos momentos juntos en todos estos años, agradecer también al Ing. Agr. Marcelo Goñi por su predisposición a la hora de concluir con la tesis y dispuesto a darme una mano en todo momento, a los compañeros de trabajo de Bayer por su afecto y el gran clima laborar con el que se desempeñan.

A mis consejeros de tesis Mag. Roberto J. Kiessling y Mag. Gabriela V. Minoldo por su predisposición para ayudarme con la finalización de la tesina.

Índice	
Índice de tablas.....	5
Índice de Figuras	6
Resumen	7
Introducción	8
Presentación de la especie	8
Características del cultivo de trigo	8
Producción en el mundo y en argentina	10
Regiones trigueras en Argentina	11
Requerimientos nutricionales del cultivo	13
Nitrógeno como limitante de la producción	14
Diagnóstico de fertilidad nitrogenada	15
Recomendación de dosis	16
Momento de aplicación del fertilizante	18
HIPOTESIS	20
OBJETIVOS	20
Materiales y Métodos.....	21
Descripción del sitio experimental	21
Descripción del ensayo	21
Eficiencias de uso del nitrógeno	25
Análisis económico	25
Análisis de datos	25
Resultados y Discusión.....	26
Caracterización climática de la campaña 2020	26
Estadística descriptiva	28
Análisis de correlación entre variables	30
Análisis de la varianza (ANOVA), comparación de medias y contrastes	31
Eficiencia de uso del N	35
Análisis económico	37
Conclusiones	38
Bibliografía.....	39

Índice de tablas

Tabla 1. Escala de Zadoks.....	12
Tabla 2. Requerimientos nutricionales, extracción e índice de cosecha.....	16
Tabla 3. Diseño del ensayo de larga duración.....	27
Tabla 4. Variables del cultivo.....	28
Tabla 5. Coeficientes para los contrastes ortogonales según efecto estudiado.....	30
Tabla 6. Disponibilidad de nitrógeno inorgánico (kg ha^{-1}) y humedad en lámina de agua (mm) en diferentes momentos del cultivo.....	33
Tabla 7. Estadística descriptiva de las variables del cultivo sin diferenciar entre tratamientos y bloques.....	34
Tabla 8. Correlación entre variables del cultivo.....	36
Tabla 9. Probabilidad del F para las fuentes de variación del ensayo, y coeficiente de variación.....	37
Tabla 10. Análisis de la varianza (ANOVA)según dosis y épocas de aplicación para el rendimiento y sus componentes.....	37
Tabla 11. Análisis de la varianza (ANOVA) según dosis y épocas de aplicación para las variables de cultivo asociadas a la calidad.....	38
Tabla 12. Comparación de grupos de medias mediante contrastes ortogonales...40	
Tabla 13. Eficiencias de nitrógeno y requerimiento del cultivo.....	42
Tabla 14. Margen bruto (kg ha^{-1}) de los tratamientos fertilizados en función del tratamiento testigo.....	43

Índice de Figuras

Figura 1. Evolución de los rendimientos del trigo a lo largo de los años en Argentina.....	13
Figura 2. Subregiones trigueras de Argentina.....	14
Figura 3. Diferentes maneras de hacer un diagnóstico para el cultivo de trigo.....	21
Figura 4. Precipitaciones mensuales para el predio Napostá y medias mensuales históricas para Bahía Blanca (histórico serie 1860-2020).....	32
Figura 5. Temperatura medias mensuales y temperaturas medias históricas para Bahía Blanca (1961-2017).....	32
Figura 6. Rendimiento (kg/ha) en función de la dosis (kg/ha).....	41
Figura 7. N cosechado (kg/ha) en función de la dosis (kg/ha).....	42

Resumen

El sudoeste bonaerense (SOB) se ubica en la región semiárida de la provincia de Buenos Aires, donde el trigo (*Triticum aestivum* L.) ocupa el primer lugar en los sistemas de producción, siendo el cereal que más se produce en Argentina. Esta región se caracteriza por poseer como principales factores limitantes del crecimiento y del rendimiento del cultivo, al agua y al nitrógeno (N). El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la fertilización nitrogenada continua con diferentes dosis y momentos sobre las variables de rendimiento del cultivo de trigo en un ensayo de larga duración (ELD) comenzado en 2009. El mismo se llevó a cabo en Colonia Napostá durante la campaña 2020. El predio pertenece a la Universidad Nacional del Sur (UNS) y se ubica a 35 km de la ciudad de Bahía Blanca sobre la Ruta Provincial 33. El diseño estadístico consiste en cuatro bloques completos al azar con seis tratamientos, con parcelas de 60 m². Los tratamientos consisten en aplicación de N en forma de urea en diferentes dosis (0, 40 y 80 kg ha⁻¹) y tres momentos, emergencia, macollaje y fraccionado sólo con la mayor dosis dividida en ambos momentos. Se utilizó urea granulada (46-0-0) en todos los tratamientos fertilizados como fertilizante nitrogenado, aplicándolo al voleo de forma manual. Los resultados arrojaron un efecto significativo de la fertilización nitrogenada favoreciendo el rendimiento y la calidad del trigo, y a su vez se observaron diferencias entre dosis y momentos de fertilización. El tratamiento que obtuvo el mayor rendimiento fue el de 40 macollaje. La calidad de los granos fue favorecida con las aplicaciones de las dosis más altas. Respecto a la eficiencia agronómica se observó un valor elevado para la región, reflejando así la absorción del nitrógeno por parte del cultivo. Se llegó a la conclusión de que la fertilización nitrogenada independientemente de la dosis y el momento mejoró notablemente el desempeño del cultivo de trigo. También podemos afirmar que la aplicación de la dosis fraccionada no produjo resultados mejores que los observados con aplicación única.

Introducción

Presentación de la especie

El trigo pan pertenece al género *Triticum*, en este caso en particular nos referiremos a la especie *Triticum aestivum* “trigo pan”, son plantas anuales de la familia de las gramíneas, dentro de la subclase monocotiledóneas (presentan un solo cotiledón). El trigo es ampliamente cultivado en todo el mundo, siendo uno de los tres cereales más producidos globalmente, junto con el maíz (*Zea mays* L.) y el arroz (*Oriza sativa* L.), y el más ampliamente consumido por el hombre en la civilización occidental desde la antigüedad (Divito & García, 2017).

Características del cultivo de trigo

Posee raíces fasciculadas que suelen llegar a medir un metro o más, aunque el 50% de las mismas se encuentran en los primeros 25 cm de suelo, con respecto a la densidad puede variar de acuerdo al sistema de producción, ya que en seco tenemos menor densidad que en regadío. El tallo tiene una particularidad debido a que en la fase vegetativa está constituido por una masa de células, denominándose meristema apical. De este mismo se producen brotes axilares que van a ser los futuros macollos. En la época de encañado se alarga, llevando entre 4-8 nudos, produciendo un tallo erecto, herbáceo y sin ramificaciones, llevando en cada nudo hojas envainadoras. Los entrenudos son huecos y el nudo es macizo. Alcanza una altura de entre 60 y 120 cm según la especie. Las hojas son alargadas y rectas, paralelinervadas y terminadas en punta, con una longitud de 15-25 cm. En cada nudo nace una hoja, compuesta por una vaina, una lámina, y en la unión de estas dos se encuentran las aurículas y la lígula. Al terminar el proceso de encañazón aparece la espiga envuelta en la última hoja (hoja bandera), ésta es la estructura reproductiva, llamándose espiga de espiguillas, ya que posee un eje llamado raquis en el cual se insertan las espiguillas alternadamente a izquierda y derecha, llegando a contener entre 15-25. Cada espiguilla posee externamente dos glumas, y posee de 3 a 5 antecios dispuestos en un eje llamado raquilla. Cada antecio compone una flor, cubierto por una lemma y una pálea. El trigo pertenece al género de plantas autóгамas, esto quiere decir que se autofecunda. Gracias a esta característica

cada variedad de trigo puede conservar el desempeño agronómico año tras año. Produce un fruto cariopse, de forma ovoide con sus extremos redondeados con una ranura en la parte ventral, está protegido por una delgada capa llamada pericarpio, el resto del grano es en su totalidad endosperma, en este caso de constitución harinosa.

Al ser un cultivo invernal tiene buena resistencia y adaptación a bajas temperaturas, ya que, la mayoría de su ciclo ocurre en el periodo invernal. Su rango de temperatura ronda entre 3-33°C, óptima entre 10-25°C. Aunque tenga buena adaptación a bajas temperaturas hay épocas en su ciclo donde los cambios bruscos de temperatura pueden afectar los tejidos en crecimiento, y hasta interferir negativamente en el rendimiento. En la época de emergencia, es susceptible a bajas temperaturas pudiéndose observar muerte de plántulas, luego en macollaje va adquiriendo mayor resistencia. En el encañado comienza un periodo de susceptibilidad teniendo su máximo riesgo en floración-antesis, es así que se llama periodo crítico a este momento del ciclo.

Los requerimientos de agua son bastante bajos, teniendo un óptimo de 400-500 mm/ciclo, pero puede desarrollarse desde 250-2800mm anuales.

Los suelos más adecuados para un crecimiento adecuado son los fértiles, sueltos, libre de inundaciones y profundos. El pH debe rondar entre 6 y 7,5, en suelos ácidos es bastante difícil esperar un buen crecimiento. Incorporar trigo en una rotación ayuda a mejorar la estructura del suelo, mejora la aireación, la permeabilidad y retiene mejor el agua.

Crecimiento y desarrollo son los procesos que ocurren en simultaneo durante el ciclo del cultivo. El primero se refiere a la acumulación de biomasa, mientras que desarrollo se refiere al avance de estados morfológicos o fisiológicos que van ocurriendo durante el ciclo de cultivo. Estos dos procesos están regulados genéticamente y a su vez tienen influencia del ambiente, es por esto que el desempeño de crecimiento y desarrollo (fenología) puede ser diferente entre variedades y, dentro de las mismas, según a las condiciones climáticas (Divito & García, 2017).

Para describir los estados morfológicos externos del cultivo la más utilizado es la escala de Zadoks (Zadoks et al., 1974), Los estados que describe pueden ser procesos de desarrollo y otros de crecimiento. Esta escala divide al ciclo de cultivo en etapas principales, y a su vez éstas se subdividen en etapas secundarias (Tabla 1).

Tabla 1. Escala de Zadoks.

Tabla de las fases de desarrollo siguiendo la escala decimal Zadoks (Z0.0 a Z9.9)					
Etapa principal	DESCRIPCIÓN	Sub-fase	Etapa principal	DESCRIPCIÓN	Sub-fase
0	Germinación	0.0-0.9	5	Espigado	5.0-5.9
1	Producción de hojas TP	1.0-1.9	6	Antesis	6.0-6.9
2	Producción de macollos	2.0-2.9	7	Estado lechoso del grano	7.0-7.9
3	Producción de nudos TP (encañado)	3.0-3.9	8	Estado pastoso del grano	8.0-8.9
4	Vaina engrosada	4.0-4.9	9	Madurez	9.0-9.9

Según J.C. Zadoks, T.T. Chang y C.F.

TP: tallo principal

Producción en el mundo y en argentina

El 50% de la población mundial tiene como alimento básico a los granos de cereales y oleaginosas y sus subproductos, los de mayor consumo son trigo, maíz, arroz, cebada y soja (Ritacco, 2003). Se prevé que para el año 2020 la producción mundial alcance los 762,7 millones de toneladas (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2021). El país más productor es la Unión Europea con 141 millones de toneladas, seguido por China con 136 millones de toneladas y la India con 107 millones de toneladas. La Argentina se ubica en el puesto 10 con 21 millones de toneladas (USDA, 2020). Argentina es el quinto exportador mundial de trigo y harina de trigo (Ritacco, 2003).

En Argentina la superficie promedio sembrada es de 6 millones de hectáreas, con un rendimiento promedio a nivel nacional de 2,7 t/ha. En nuestro país el aumento

del rendimiento fue bajo hasta los años 60, luego en el siglo XX hubo un aumento marcado de los rindes favorecido por la introducción de los materiales semienanos (Miralles & González, 2009) (Figura 1).

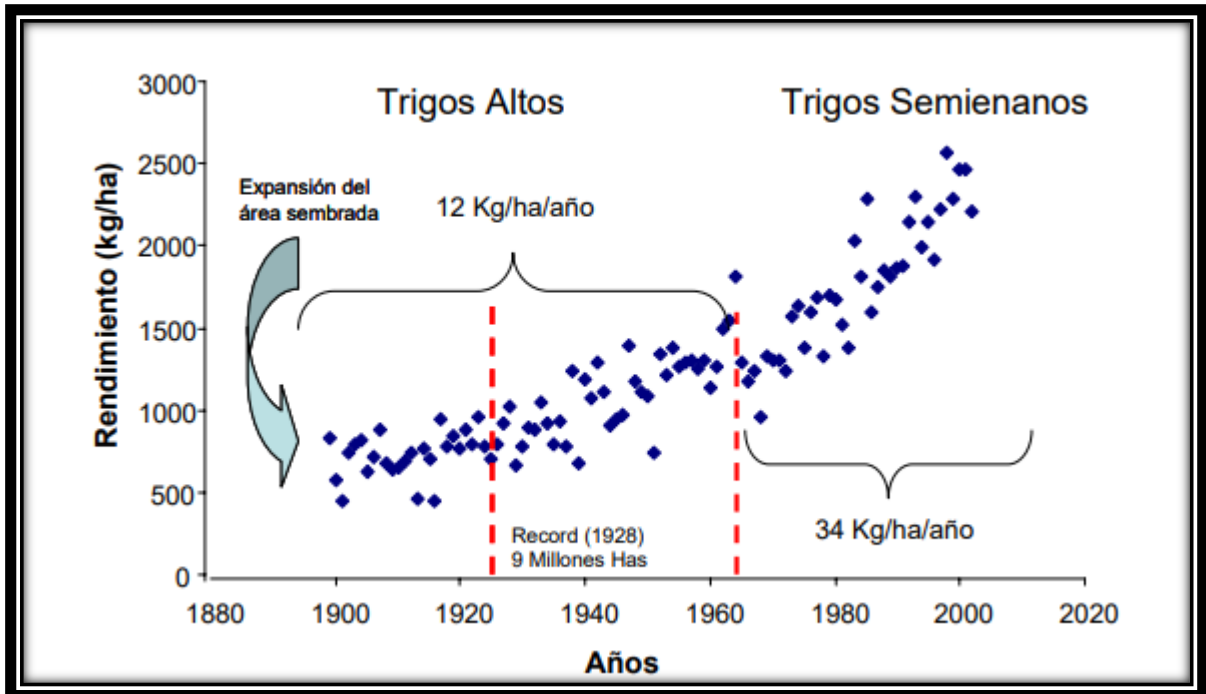


Figura 1: Evolución de los rendimientos del trigo a lo largo de los años en Argentina (Fuente SAGyP).

Regiones trigueras en Argentina

La producción de trigo en Argentina está dividida en nueve sub-regiones, desde el NOA y NEA (Noroeste y Noreste argentino) hasta el sur de la zona pampeana (IV y V SUR), comprendiendo la zona entre los 30-40° de latitud sur y 57-68° de longitud oeste. Estas subregiones poseen características agroecológicas diferenciales (Molfese et al., 2014) (Figura 2).



Figura 2: Subregiones trigueras de Argentina (Molfese et al., 2014).

La ubicación del predio se ubica en el sudoeste bonaerense (SOB), y a su vez está dentro de la subregión V Sur. El SOB forma parte de una zona semiárida, árida y sub-húmeda seca del país, esto hace que posea ciertas limitaciones para la producción primaria, debido a las características edáficas y climáticas de la región. La subregión V Sur está integrada por los partidos de Guaminí, Adolfo Alsina, Coronel Suárez, Coronel Pringles, Coronel Dorrego, Saavedra, Tornquist, Puán, Coronel Rosales, Bahía Blanca, Villarino y Patagones. Esta zona representa un 20% de la producción nacional de trigo (1 millón ha), siendo el mismo la base de los sistemas productivos de gran parte del SOB. Las condiciones climáticas y las propiedades edáficas tienen gran influencia sobre los rendimientos del cultivo de trigo, es por esto que hay que hacer un uso eficiente del agua y del nitrógeno (Kießling et al., 2013). En suelos de régimen *Ústico* los rendimientos medios son de 1600 kg/ha, y para los de régimen *Údico* son de 1900 kg/ha (Ron & Loewy, 1999). Esta región se caracteriza por tener una gran variabilidad climática. Las precipitaciones pueden oscilar entre valores de muy bajos a valores muy por encima de la media anual, esto se da por los llamados vulgarmente años “Niño” (período húmedo) o años “Niña” (períodos secos) (Zotelo, 2012).

Las lluvias se concentran en las estaciones de otoño y primavera, teniendo un mínimo en el invierno, y en los últimos años se observó un aumento en la estación de verano (Campo et al., 2009).

Respecto a la temperatura se registran veranos e inviernos bien marcados y primaveras y otoños moderados. Los valores medios de temperatura anual rondan entre 14-20°C, pudiéndose registrar temperaturas extremas de 40°C en la estación cálida. El periodo de heladas se extiende desde mediados de abril hasta principios de noviembre.

Requerimientos nutricionales del cultivo

En la tabla 2 se muestra la cantidad de nutrientes que el trigo necesita para producir una tonelada de grano, el porcentaje que absorben los granos (índice de cosecha), y la extracción. Estos requerimientos nutricionales provienen de valores promedios, existiendo variaciones según el rendimiento, disponibilidad del nutriente e interacción con otros factores.

Tabla 2. Requerimientos nutricionales y extracción del trigo por tonelada de grano.

Fuente: INPOFOST

Nutriente	Requerimiento kg/ton grano	Índice de Cosecha	Rendimiento de 5000 kg/ha Necesidad kg/ha	Extracción kg/ha
Nitrógeno	30	0.66	150	99
Fósforo	5	0.75	25	19
Potasio	19	0.17	95	16
Calcio	3	0.14	15	2
Magnesio	3	0.50	15	8
Azufre	4.5	0.25	23	6
Boro	0.025		0.125	
Cobre	0.010	0.75	0.050	0.038
Hierro	0.137		0.685	
Manganeso	0.070	0.36	0.350	0.126
Zinc	0.052	0.44	0.260	0.114

No solo es importante conocer los requerimientos totales, sino que también debemos evaluar la dinámica de absorción durante el ciclo del cultivo. El trigo, al igual que otros cultivos, posee la característica de adelantar la absorción de los nutrientes respecto a la de producción de materia seca, esto quiere decir que mientras hasta antes de la cosecha acumula el 40-45% de la biomasa aérea total, la acumulación de nitrógeno (N) a floración representa el 70-75% del total, y de fósforo acumula el 75-85% del total, tomando como ejemplos estos dos nutrientes que son los más deficientes en los sistemas productivos (Divito et al., 2017).

Nitrógeno como limitante de la producción

Es el nutriente que limita la producción vegetal con mayor frecuencia, esto es así, ya que, los cultivos lo requieren en grandes cantidades y a su vez la frecuencia con que se observan sus deficiencias en los suelos. El tener una baja disponibilidad de N, provoca una reducción de la eficiencia de conversión de la radiación interceptada, el índice de área foliar y su duración lo que se ve afectado el peso seco de las espigas a floración. Esto repercute directamente sobre el número de granos, siendo éste el principal componente del rendimiento del cultivo de trigo. Considerando que el sur bonaerense participa en el 30% de la producción nacional de trigo (SAGPyA, 2006), la fertilización con N es una práctica de manejo indispensable para alcanzar rendimientos elevados (Calvo & Echeverría 2006).

En el Sudoeste Bonaerense, debido a los bajos niveles de materia orgánica (MO) de los suelos, es necesario realizar un buen diagnóstico de la fertilidad y luego el cálculo de las necesidades de fertilización (Loewy et al., 2015). Además, en regiones con mayores limitantes hídricas se ha incrementado el uso de fertilizantes nitrogenados. Es de gran importancia que en estas regiones se optimice la aplicación de dichos fertilizantes, ya que, debido a las condiciones climáticas imperantes se hace dificultoso (Galantini et al., 2000; Minoldo, 2010).

A lo largo del ciclo del cultivo la demanda de N por parte del trigo es variable. En los primeros estadios, que comprende desde la emergencia hasta inicio de macollaje, existe una baja absorción debido a que su crecimiento es lento, al igual que la diferenciación de los órganos. Al avanzar en la etapa de macollaje, la absorción se

va elevando en forma más o menos lineal. Luego, al principio del alargamiento de la caña la absorción se hace exponencial, en este período la absorción diaria es máxima debido a la producción de biomasa. Pasada esta etapa comienza a disminuir su absorción. Al momento de floración, hay aproximadamente un 90% de absorción de N del total que acumula el cultivo (Álvarez et al., 2007). El N, nutriente muy móvil en la planta, permite que en fin de encañazón-prefloración se comience a translocar desde raíces, tallo y hojas, hacia la espiga y los granos, esta fuente puede llegar a cubrir del 50% al 100% del N acumulado en los granos (Abbate et al., 2006).

Diagnóstico de fertilidad nitrogenada

Para una correcta determinación de la dosis a aplicar, hacer un análisis de suelo es uno de los pasos fundamentales (Darwich, 2004). Para obtener una buena precisión, los modelos de fertilización nitrogenada deben tener en cuenta variable edáficas, climáticas y de manejo, y en relación a los rendimientos esperables de cada zona. Para mejorar la fertilización se debe tener conocimiento de las prácticas de manejo sobre la dinámica del N, esto es tener en cuenta el N mineralizable en el ciclo del cultivo, la eficiencia del N aplicado, y de las posibles pérdidas. Debido a esta dinámica la forma más correcta de hacer el diagnóstico es cerca del momento de siembra (Berardo, 1994).

Para realizar un diagnóstico a nivel de lote se pueden realizar observaciones directas y recabar información del productor sobre el uso previo del mismo (Abbate et al. 2006). El análisis en planta en etapas posteriores ayuda a actualizar el diagnóstico. Estos aportan la ventaja de integrar los efectos de factores climáticos y edáficos sobre el estado nutricional del cultivo. El rendimiento en grano puede relacionarse con la concentración de nitratos en los pseudotallos en distintos estadios. La determinación del contenido de nitratos en el jugo de la base del tallo y el índice de verdor con un medidor de clorofila son alternativas más rápidas para la determinación.

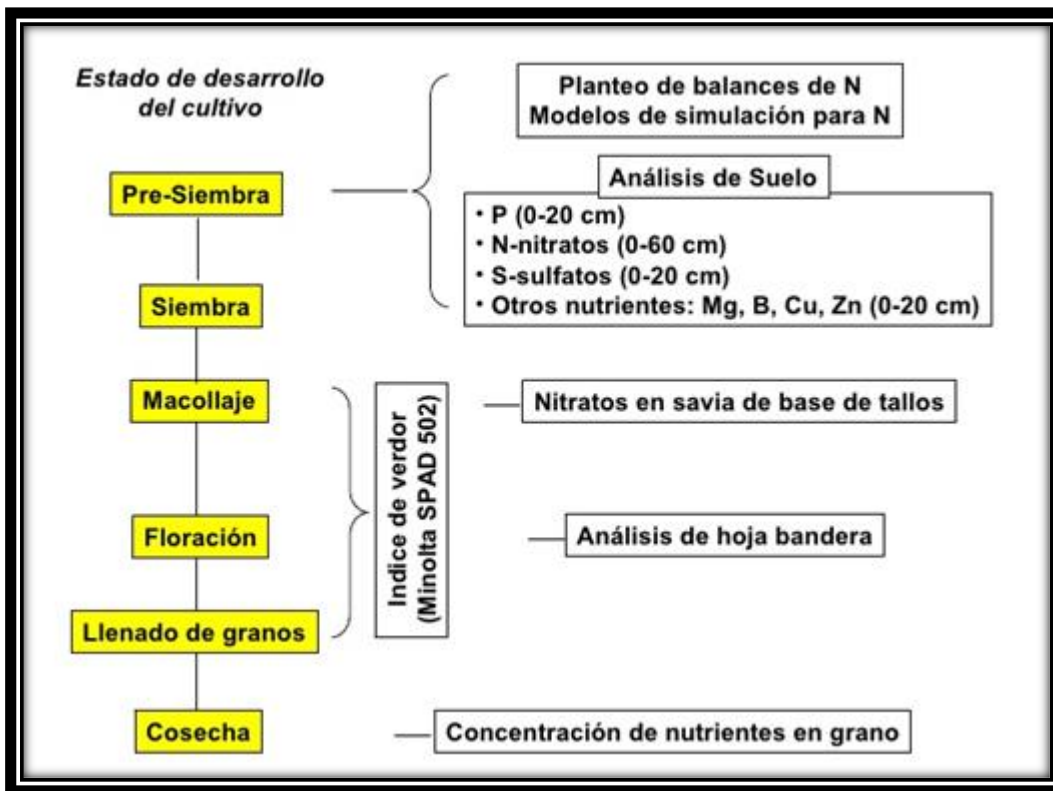


Figura 3. Diferentes maneras de hacer un diagnóstico para el cultivo de trigo (Abbate et al. 2006).

Recomendación de dosis

Basándonos en el resultado de la cantidad de nutriente encontrado en el análisis de suelo, en este caso N, y junto con el rendimiento potencial esperado para nuestra zona, procederemos a calcular la cantidad de fertilizante que debemos suministrar para lograr dicho rendimiento, tomando como herramienta el uso de un balance simplificado de N, a esto se le suma saber decidir en qué momento y de qué forma se aplica el fertilizante, esto es de gran importancia para lograr la mayor absorción del mismo.

Para realizar el cálculo de la dosis de fertilizante a aplicar se puede utilizar el balance, que integra los egresos y los ingresos de N inorgánico en el suelo. El objetivo es que los ingresos deben ser iguales a las pérdidas más lo removido por el cultivo. Generalmente estas evaluaciones se hacen para la capa de suelo que va a ser explorada por las raíces.

Uno de los modelos más utilizados para realizar el balance de N es el propuesto por García et al, 1994:

$$N_f + N_a + N_{mo} + N_{ii} = N_p + N_g + N_l + E_n + N_{iim} + N_{if}$$

Los términos que correspondientes a los ingresos son:

- N_f = N aportado por el fertilizante.
- N_a = N aportado por fijación biológica y/o lluvias.
- N_{mo} = N mineralizado de la materia orgánica.
- N_{ii} = N inorgánico inicial.

Los términos correspondientes a los egresos son:

- N_p = N absorbido por la planta.
- N_g = N perdido en formas gaseosas.
- N_l = N perdido por lavado.
- E_n = N perdido por erosión.
- N_{iim} = N inorgánico inmovilizado.
- N_{if} = N inorgánico final.

Cuando la provisión de N del suelo es suficiente para rendimiento esperado, no será necesario la aplicación de fertilizante, esto quiere decir que N_f será 0.

Para la estimación de estos términos se considera que:

- Debido a la baja residualita del nitrógeno, es aconsejable minimizar el nitrógeno inorgánico final $N_{if} = 0$
- El N_a no es significativo para no-leguminosas.
- N_p , N_l y E_n son función del N disponible durante el ciclo del cultivo.
- N_{ii} se puede estimar por análisis de suelos.
- La diferencia entre N_{iim} y N_{om} puede ser definida como N min.

Utilizar un programa de fertilización balanceada nos ayuda a obtener mejores rendimientos, haciendo que nos acerquemos a los rendimientos potenciales, y mantienen y mejoran la sustentabilidad de los sistemas de producción (García, 2003).

Momento de aplicación del fertilizante

Según las condiciones ambientales, la respuesta al agregado de N varía considerablemente, y esto afecta la eficiencia de uso de N, controlan el macollaje y la capacidad de producir espigas, la fertilización de las flores y el llenado de granos. De lo contrario cuando no tenemos limitaciones de agua u otro factor ambiental el rendimiento final y la producción de biomasa estará relacionado directamente con la disponibilidad de N (García, 2004). El momento de aplicación de N al cultivo de trigo puede ser a la siembra o luego de implantado, en la época de macollaje práctica generalmente recomendada en las zonas más húmedas. Otra alternativa es realizar el fraccionamiento de la dosis total de N a aplicar, haciéndolo entre siembra y macollaje (Ron & Loewy, 2000).

En ciertas ocasiones una disponibilidad muy alta de N en etapas iniciales del cultivo es perjudicial, debido a que existe una proliferación excesiva de macollos y una caída en rendimiento en grano y/o deterioro de su calidad. En controversia una disponibilidad alta de N en inicio del encañado puede favorecer la sobrevivencia de macollos y la formación de espigas (García, 2004).

Además, del efecto que produce la fertilización de N sobre los componentes del rendimiento, se debe conocer la demanda en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo, esto lleva a lograr hacer un uso más eficiente del N.

La absorción de N por parte del trigo aplicado a la siembra como urea (46-0-0) depende de las condiciones ambientales. Se ha estimado que , con aplicaciones de entre 30-60 kg/ha en promedio un 40% de N es recuperado y un porcentaje menor con dosis mayores de N. La baja eficiencia con aplicaciones a la siembra puede estar asociada a la reducción de la disponibilidad del N en el suelo, por la pérdida de nitratos por lavado en el perfil o hacia la atmosfera en forma de gas. Por estos motivos y teniendo en cuenta el patrón de absorción por parte del cultivo, debemos tener en cuenta que el riesgo de pérdida de N aplicado inicialmente como fertilizante es evidente. Cuando la cantidad de N aplicado a la siembra es elevada las perdidas pueden ser mayores, al igual que en siembras tempranas ya que, es mayor la exposición del N a los procesos que causan dichas pérdidas (García, 2004). Una de las estrategias para aumentar al máximo la eficiencia de fertilización es hacer un

fraccionamiento del N total a aplicar, esto sería sincronizar la aplicación del fertilizante con la demanda en cada estado de crecimiento del cultivo, y así tendríamos poco N susceptible a perderse. El objetivo principal del fraccionamiento de es reducir la cantidad de N que se pierde. Alcanzar un 100% de eficiencia de recuperación del N aplicado es impensable, pero si utilizando esta práctica se llegara a 50% disminuiría el costo de producción del trigo y el riesgo ambiental. Varios estudios obtuvieron los rendimientos más altos y mejores resultados económicos cuando se aplicó una dosis moderada de N a la siembra, que es entre 20-60 kg/ha y luego se refertilizó cuando finalizó el macollaje (García, 2004).

En base a lo expuesto y atendiendo a que existe alta variabilidad en las precipitaciones entendemos que hacer aplicaciones tardías tiene la ventaja de poder evaluar las condiciones meteorológicas previo a la labor, siendo la más importante las precipitaciones y en base a esto planear la aplicación del fertilizante, teniendo en cuenta la disponibilidad de agua en el suelo y el pronóstico (Cantamutto et al., 1986).

HIPOTESIS

- El desarrollo y producción del trigo es afectado por el momento y dosis de aplicación del N.
- Aplicaciones de N fraccionadas favorecen la producción de trigo comparándolas con la aplicación en un solo momento.

OBJETIVOS

- Evaluar el efecto de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento, sus componentes y la calidad del grano de trigo pan.
- Estudiar el efecto de la dosis y momento de aplicación sobre el cultivo.
- Estudiar los efectos de una única aplicación de fertilizante nitrogenado en siembra-emergencia o macollaje, comparándola con el fraccionamiento de la dosis en ambos momentos.

Materiales y Métodos

Descripción del sitio experimental

El ensayo está ubicado en un establecimiento rural ubicado en Colonia Napostá, a una distancia de 35 km de la ciudad de Bahía Blanca sobre la Ruta Nacional 33, cabecera del partido con igual nombre y sede de la Universidad Nacional del Sur. En este lugar se lleva a cabo un ensayo de larga duración (ELD) desde el año 2009. La precipitación media anual es de 560 mm (medias tomadas desde 1860 al 2006). Estas precipitaciones son heterogéneas a lo largo del año, siendo las estaciones más lluviosas el otoño (mayor pico de precipitaciones) y primavera. Por el contrario, los meses más secos corresponden a junio, julio y agosto, y se registra una estación semiseca en enero y febrero, cuando la evapotranspiración potencial es el doble de las precipitaciones, provocando casi imposibilitando la producción de cultivos de verano.

Descripción del ensayo

El lote destinado al ELD hasta el año 2008 registraba una historia con más de 20 años de pastoreo sobre praderas naturales. Algunas de las especies presentes hasta esa fecha eran *Amelichloa*, *Nassella*, *Pappophorum* y *Stipa*. En 2008, un año previo a que comience el ELD, se sembró trigo pan, con sistema de labranza convencional y sin fertilización. Cosechado el trigo se dio comienzo al ELD utilizando siembra directa hasta la fecha. La topografía del sitio experimental, con edafoclima ústico-térmico, corresponde a un paisaje plano, con algunas ondulaciones resultado de episodios eólicos, procesos de erosión/deposición, y eventos de origen marino. El diseño estadístico es de cuatro bloques completos al azar, con un tamaño de unidades experimentales de 60 m². La profundidad efectiva del suelo es de 80 cm en la parte superior de la ladera (Bloque I), y cercana al metro en los restantes bloques.

Orden et al. (2011), realizaron una descripción detallada de la variabilidad espacial y las condiciones iniciales del suelo con respecto a la fertilidad en el sitio de ensayo. Por medio de esta investigación se clasificó el suelo como *Paleustol Petrocálcico*

(Soil Survey Staff, 2010), franco grueso térmico, con la característica de no presentar limitaciones físicas para la producción.

Para las condiciones generales de la fertilidad química, en las muestras de suelo tomadas al inicio del ensayo, se obtuvieron valores coherentes a la textura y frecuentes para la zona, obteniendo valores de capacidad de intercambio catiónico de $14,3 \text{ cmol kg}^{-1}$ y 17 g kg^{-1} de carbono orgánico. El pH 7,6, ligeramente alcalino, no representando una limitación para el crecimiento del trigo.

Los valores de nutrientes disponibles al comienzo del ensayo fueron los siguientes:

- Fosforo extraíble (Bray y Kurtz), 9 mg kg^{-1} , correspondiéndole una baja a moderada disponibilidad.
- Potasio asimilable adecuado con un valor entre $367\text{-}461 \text{ mg kg}^{-1}$.
- La disponibilidad de calcio es alta e intermedia para el magnesio, el suministro de este último podría verse perjudicado debido a la alta relación Ca:Mg.
- Bien provisto de Hierro y Manganeseo.
- Cobre y Zinc moderadamente provisto.
- El Boro extraíble tiene un valor de $1,8 \text{ mg kg}^{-1}$ siendo 4 veces mayor al promedio informado para los Ustoles de la zona.

El diseño de tratamientos consistió en una combinación de diferentes dosis y épocas de aplicación de fertilizante nitrogenado con cuatro bloques completos al azar (Tabla 3).

Tabla 3. Diseño del ensayo de larga duración.

Tratamiento	Nomenclatura	Dosis total (kg N ha ⁻¹)	Época de aplicación	
			Ne	Nm
1	0	0	0	0
2	40e	40	40	0
3	80e	80	80	0
4	40m	40	0	40
5	80m	80	0	80
6	40e + 40m	80	40	40

Ne: aplicación en siembra-emergencia; Nm: aplicación en macollaje.

El cultivo se sembró el 19 de junio de 2020, utilizando una sembradora Juber® de siembra directa con separación entre hileras de 17,5 cm. La variedad de trigo utilizada fue *ACA 360*, y la densidad de 220 plantas m⁻² (90 kg ha⁻¹). Al momento de la siembra, en la línea, se aplicaron 65 kg ha⁻¹ de fosfato monoamónico (11-20-0, grado). Con el cultivo recién emergido (aproximadamente 10 días después de la siembra) se fertilizó con urea (46-0-0, grado), en forma manual. De igual forma, en la época de macollaje, se aplicó fertilizante el día 20 de octubre, en Z25. La tabla 4 detalla las abreviaturas y unidades para cada variable del cultivo, que serán utilizadas.

Tabla 4. Variables del cultivo

Variable	Abreviatura	Unidades	Momento	Determinación-cálculo
Biomasa aérea cosecha	Bac	kg ha ⁻¹	Madurez fisiológica	Cosecha 4 m lineales
Numero Espigas m ⁻²	ESPM ²	número	Poscosecha	Conteo 4 m lineales
Rendimiento	REND	kg ha ⁻¹	Poscosecha	Cosecha 4 m lineales
Índice de cosecha	IC	número	Poscosecha	Por cálculo IC = REND/Bac
Peso de mil granos	PMIL	g	Poscosecha	Conteo y pesaje
Granos m ⁻²	GRANm ²	número	Poscosecha	Por cálculo GRANm ² = REND*100/ PMIL
Granos por espiga ⁻¹	GRANESP	número	Poscosecha	Por cálculo GRANESP = GRANm ² / ESPm ²
Peso hectolítrico	PH	kg hL ⁻¹	Poscosecha	Pesaje de volumen.
Proteína en grano	PROT	%	Poscosecha	NIR
N cosechado	Ncos	kg ha ⁻¹	Poscosecha	Por cálculo REND * %N/100

En madurez fisiológica, 15 de diciembre, se realizó el corte de las plantas a unos 5 cm del suelo, eligiendo al azar 4 segmentos lineales de 1 m de todas las unidades experimentales. Luego, en el laboratorio se procedió al procesado de las muestras, separando espigas y tallos. Se obtuvo el peso de espigas y tallos, y también la biomasa aérea total (Bac). Se hizo un recuento de las espigas (ESPM⁻²c) y se determinó el peso individual. También, trilló el trigo determinando el rendimiento en grano (REND).

El peso de mil granos de cada tratamiento se llevó a cabo con un dispositivo laser contador de semillas Ele international serie 0680193 G®, realizando cuatro repeticiones de 100 semillas, a las que luego se las multiplicó por 10. El peso hectolítrico (PH) se determinó con balanza de Schopper.

De forma complementaria a los datos de cultivo, se hicieron muestreos de suelo para determinar la disponibilidad de N inorgánico (Ni; N-nitratos + N-amonio), Mulvaney (1996) y humedad gravimétrica, en las profundidades de 0-30 y 30-60 cm, tanto en siembra, macollaje y madurez fisiológica. Para la medición de las

precipitaciones se utilizó un pluviómetro ubicado en el establecimiento donde se desarrolla el ensayo.

Eficiencias de uso del nitrógeno

Con las variables rendimiento (REND) y N cosechado por biomasa (Ncos) se ajustaron ecuaciones lineales en función de la dosis de N aplicada. Se obtuvieron la eficiencia agronómica (EAGR) y la eficiencia de recuperación (EREC) utilizando las pendientes de las ecuaciones resultantes. Luego, con estos dos datos se calculó la eficiencia fisiológica (EFIS) mediante el cociente entre EAGR y EREC. Por último, los requerimientos de N del cultivo se calcularon a través de la inversa de la EFIS.

Análisis económico

Para el análisis económico de la respuesta a la fertilización se tomaron los valores del precio trigo y de la urea granulada, el costo de aplicación de fertilizante al voleo y precio del dólar a diciembre 2020.

Precio trigo: 205 u\$s t⁻¹

Precio urea granulada: 530 u\$s t⁻¹

Costo de aplicación de fertilizante al voleo: 10 u\$s ha⁻¹

Precio del dólar a diciembre 2020: 88,9 \$ u\$s⁻¹.

De los mismos y con las medias de rendimientos del ensayo se elaboró la tabla con los costos adicionales por la aplicación de urea, al igual que los ingresos adicionales que se reciben por los mayores rendimientos en comparación con el testigo, y el margen bruto, resultante de restar ambas variables.

Se estimó la relación kg de grano: kg de N⁻¹ (R). También, se calculó la dosis óptima económica (DOE) ajustada a la ecuación de rendimiento en función de la dosis de N aplicada.

Análisis de datos

Para los análisis estadísticos de resultados se utilizó estadística descriptiva, que incluye la media, coeficiente de variación (CV), valores mínimos y máximos,

mediana, cuartil 1 (Q1) y cuartil 3 (Q3). Para encontrar posibles valores erráticos se utilizaron gráficos de caja y brazos (box-plot). Para evaluar el efecto de las fuentes de variación (tratamiento y bloque) se realizó un análisis de la varianza (ANOVA), comparación de medias por diferencia mínima significativa de Fisher al 5% (DMS). También se compararon grupos de medias a través de contraste ortogonales, Tabla 5. Se evaluó la relación entre las variables del cultivo mediante correlaciones de Pearson. Se realizaron regresiones lineales simples entre REND y Ncos con la cantidad de N aplicado. Se utilizó el software estadístico INFOSTAT para la realización de todos los análisis (Di Rienzo *et al.*, 2008).

Tabla 5. Coeficientes para los contrastes ortogonales según efecto estudiado

Tratamientos	testigo	40e	80e	40m	80m	40e+40m
Efectos de contraste						
1 Fertilizado vs testigo	-5	1	1	1	1	1
2 Emergencia vs macollaje	0	-1	-1	1	1	0
3 Fraccionamiento vs aplicación única	0	0	1	0	1	-2
4 40 kg N ha ⁻¹ vs 80 kg N ha ⁻¹	0	-3	2	-3	2	2
5 Interacción entre dosis y épocas	0	-1	1	1	-1	0

Resultados y Discusión

Caracterización climática de la campaña 2020

La cantidad y distribución de las precipitaciones y los promedios anuales históricos se resumen en la Figura 4. El total anual de precipitaciones fue de 547 mm, asemejándose bastante a los 561 mm de la media histórica de la serie (1860-2016), aunque fue superior a los 505 mm del año 2019.

Las precipitaciones en los meses de enero, febrero y mayo fueron bajas respecto a la media histórica, en cambio en los meses de noviembre y diciembre superaron considerablemente la media, siendo el mes de noviembre de gran importancia en desarrollo de cultivo, entre espigazón y antesis (Miralles, 2004). Las precipitaciones en otoño permitieron cargar el perfil y llegar a la siembra con buena humedad.

Las temperaturas, que siguieron un patrón normal respecto a la media histórica, se observó un incremento en marzo y un descenso en julio (Figura 5), aunque sin consecuencias para el desarrollo del cultivo, debido al momento en que ocurrieron.

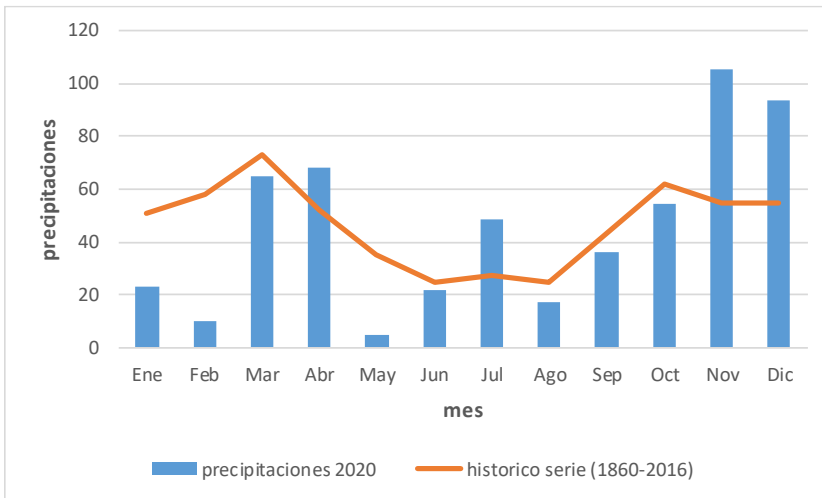


Figura 4: Precipitaciones mensuales para el predio Napostá y medias mensuales históricas para Bahía Blanca (histórico serie 1860-2020).

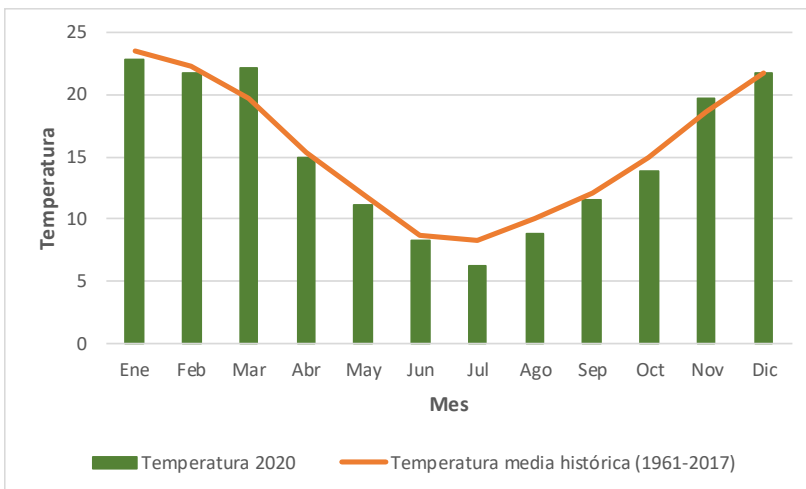


Figura 5: Temperatura medias mensuales y temperaturas medias históricas para Bahía Blanca (1961-2017).

En la Tabla 6 se presentan la disponibilidad de N ($N-NO_3^- + N-NH_4^+$) y la humedad (mm) de los primeros 60 cm del suelo. Los a la siembra, macollaje y cosecha del trigo, en dos tratamientos contrastantes.

Tabla 6. Disponibilidad de nitrógeno inorgánico (kg ha^{-1}) y humedad en lámina de agua (mm) en diferentes momentos del cultivo.

	Prof. (cm)	N disponible (kg ha^{-1})		Humedad (mm)	
		Testigo	80m	Testigo	Fertilizado
Siembra	0-30	37,4 b	55,9 a	56,5 a	60,1 a
	30-60	34,5 b	75,1 a	64,0 a	62,1 a
	0-60	71,9	131,0	120,5	122,2
		N disponible (kg ha^{-1})		Humedad (mm)	
		Testigo	Fertilizado (80e)	Testigo	Fertilizado (80e)
Macollaje	0-30	71,6 a	40,0 b	54,9 a	47,6 a
	30-60	59,1 a	54,6 a	51,4 a	54,7 a
	0-60	130,7	94,6	106,3	102,3
		N disponible (kg ha^{-1})		Humedad (mm)	
		Testigo	Fertilizado (80m)	Testigo	Fertilizado (80m)
Cosecha	0-30	50,8 a	87,2 a	37,6 a	29,3 a
	30-60	57,7 a	80,2 a	38,2 a	27,5 a
	0-60	108,5	167,4	75,8	56,8

En cada profundidad, letras diferentes indican diferencias significativas para cada variable entre tratamientos.

La disponibilidad de agua a la siembra fue adecuada, dado por las precipitaciones que se registraron en marzo y abril, los cuales cargaron de agua al perfil del suelo independientemente del tratamiento. Sin embargo, en lo que respecta a la disponibilidad de N inorgánico se puede observar una clara diferencia positiva en el tratamiento fertilizado. En macollaje, la disponibilidad de agua disminuyó, dado por el consumo hídrico por parte del cultivo. En cambio, la disponibilidad de N no demostró variaciones, esto puede deberse al mayor consumo por parte de las plantas o por pérdidas. En cosecha vuelve a suceder lo mismo que en siembra, la disponibilidad de N en el tratamiento fertilizado es mayor, pudiendo deberse por un lado a la acumulación por parte de la aplicación al macollaje, y a su vez por una tasa de mineralización más elevada debido al aumento de las temperaturas.

Estadística descriptiva

Los coeficientes de variación de los resultados (CV) oscilaron desde 2% para el PH hasta 25% en Ncos (Tabla 7). Estas variaciones fueron dadas principalmente por los efectos de los diferentes tratamientos y bloques. Con respecto a la media y a la

mediana fueron muy cercanas en todas las variables, dando como resultado una distribución simétrica. En los análisis con gráficos de cajas y brazos no se encontraron casos atípicos (datos no mostrados).

Como se observa el rendimiento promedio del ensayo fue de 2328 kg ha⁻¹, siendo el mismo un poco más alto que el promedio histórico zonal de 1600-1900 kg ha⁻¹ (López et al., 2013). Con respecto a ESPm₂, se obtuvo un promedio de 365, el cual se halla fuera del rango normal de 400-700 ESPm₂ propuesto por Miralles et al., (2014). El PMIL fue de 39, valor promedio según evaluaciones de cultivares en INTA Ascasubi en las campañas 2012-2015. (Vanzolini & Logiúdice, 2016). En cuanto a GRANm₂ y GRANESP se observan valores inferiores a los promedios obtenidos para la zona centro de la provincia de Córdoba, citado por Gasparotto (2014).

El PH de 76 lo posiciona en un trigo de calidad Grado 2 según la norma de comercialización de trigo pan, aunque tenemos un mínimo de 74 que pertenece a Grado 3, y hasta un máximo de 80 del Grado 1. El valor medio de proteína fue de 13,8%, casi 3 puntos por encima de los 11% que requiere como base la norma de comercialización, llegando a tener valores por encima de 16, y un mínimo de 9,9%.

Tabla 7. Estadística descriptiva de las variables del cultivo sin diferenciar entre tratamientos y bloques.

Variable		Media	CV	Min	Max	Mediana	Q1	Q3
Bac		6517	18,6	4100	8600	6793	5800	7157
REND	(kg ha ⁻¹)	2328	24,4	1478	3326	2230	2125	2691
ESPM ²		366	17	247	476	374	326	403
GRANESP		16	7	14	19	16	15	17
GRANm ²		5954	21	3661	8166	5862	5325	6673
PH	(kg hL ⁻¹)	76,6	2,2	74,1	80,2	76,7	74,8	77,9
IC	(%)	0,36	8,5	0,3	0,4	0,37	0,33	0,38
PMIL	(g)	39,1	3,9	36,1	41,5	39,5	37,8	40,4
PROT	%	13,8	13,2	9,9	16,3	14	12,6	15,1
Ncos	(kg ha ⁻¹)	56,4	25,4	25,5	78,7	59,5	48,8	64,7

Análisis de correlación entre variables

En la tabla 8 se observan las correlaciones entre las variables de cultivo, encontrándose que el REND se correlacionó significativamente y de forma positiva con Bac, ESPm², GRANm², GRANESP, IC y Ncos. Esto nos da la certeza que el REND se asocia con la mayoría de sus componentes, excepto con PMIL, PH y PROT ya que no hubo correlación significativa. Que no exista una asociación significativa del PMIL con REND nos da la pauta de que el mismo incide menos en el rendimiento, reafirmando lo expuesto por otros autores (López et al., 2002; Satorre et al., 2003; Miralles et al., 2014; Borisov, 2015; Carestía et al., 2017). Esto deja en evidencia que la variable con más peso en la generación del rendimiento es GRANm², ya que, se correlaciona significativamente con Bac, ESPm², REND, GRANESP, IC y Ncos.

Se encontraron asociaciones significativas negativas de la PROT con PMIL y PH, esto nos da la pauta de que la PROT se concentra en mayor cantidad en los granos más pequeños y con menor PH, dando resultados similares a lo expuesto por otros autores de este mismo EDL (Colla, 2013; Gutiérrez, 2013; Jauregui, 2014 y Borisov, 2015).

El PMIL se asoció significativamente con el PH, y a su vez con el IC, mostrándonos que cuando aumenta el PMIL obtenemos semillas con PH más elevados y aumenta el IC.

El Ncos se correlacionó de manera significativa con la PROT y el REND, esto nos indica que en las parcelas con mayores REND la extracción de N por parte del cultivo es mayor.

Tabla 8. Correlación entre variables del cultivo

	Bac	ESPM ²	REND	PMIL	GRANm ²	GRANESP	PH	IC	PROT	Ncos
Bac	1									
ESPM ²	0,97	1								
REND	0,92	0,92	1							
PMIL	-0,08	-0,11	0,11	1						
GRANm ²	0,93	0,94	0,98	-0,06	1					
GRANESP	<u>0,46</u>	<u>0,42</u>	0,7	0,03	0,7	1				
PH	-0,01	0	0,13	<u>0,45</u>	0,06	0,11	1			
IC	0,08	0,17	<u>0,46</u>	<u>0,42</u>	<u>0,4</u>	0,72	0,34	1		
PROT	<u>0,43</u>	<u>0,42</u>	0,23	-0,67	0,33	0,08	<u>-0,51</u>	-0,37	1	
Ncos	0,92	0,92	0,91	-0,2	0,94	<i>0,59</i>	-0,1	0,24	<i>0,61</i>	1

Coefficientes subrayados, en cursiva y negrita significativos a $p < 0,05$; 0,01 y 0,001, respectivamente.

Análisis de la varianza (ANOVA), comparación de medias y contrastes

En la Tabla 9 se detallan los resultados del análisis de la varianza (ANOVA), mostrando efectos significativos de los tratamientos para siete variables (Bac, ESPm², REND, PMIL, GRANm², PROT y Ncos). Respecto a los bloques, se observan diferencias significativas en 2 variables (IC, PROT), esto puede deberse a la variabilidad entre los mismos que ha sido descrita por Orden et al. (2011). Las variables PMIL y PH mostraron CV de entre 2-3%, PROT 4,24%, IC y GRANESP entre 6-7,5 %, y Bac, ESPm², REND, GRANm² y Ncos entre 12-17%.

Tabla 9. Probabilidad F para las fuentes de variación del ensayo, y coeficiente de variación.

Variables	pTratamiento	pBloques	CV (%)
Bac	0,0036	0,4643	13
ESPM²	0,004	0,5012	12
REND	0,0233	0,3065	17
IC	0,3663	0,0066	6
PMIL	0,0064	0,5125	2,8
GRANm²	0,0213	0,4081	17
GRANESP	0,4330	0,2746	7,2
PH	0,2453	0,0600	2,2
PROT	<0,0001	0,0011	4,2
Ncos	0,0007	0,4179	16

Comparación de medias por diferencia mínima significativa ($p < 0,05$).

Las comparaciones de medias individuales por DMS y los promedios para los tratamientos se muestran en la Tabla 10 y 11, realizando comparación entre fraccionamiento para la misma dosis y de diferente dosis para el mismo momento de fertilización.

Tabla 10. Análisis de la varianza (ANOVA) según dosis y épocas de aplicación para el rendimiento y sus componentes.

Tratamiento	REND		ESPM²		GRANm²		GRANESP		PMIL	
Testigo	1725	A	272	A	4229	A	15	A	41	B
40e	2368	BC	377	BC	6041	B	16	A	39	AB
80e	2653	BC	413	C	6749	B	16	A	39	AB
40m	2769	C	403	BC	6900	B	17	A	40	B
80m	2141	AB	338	AB	5683	AB	17	A	38	A
40e-40m	2314	ABC	390	BC	6131	B	16	A	38	A
DMS	590		66		1494		1,75		60	

Letras diferentes indican diferencias significativas para cada variable entre tratamientos. DMS=diferencia mínima significativa ($p < 0,05$)

Tabla 11. Análisis de la varianza (ANOVA) según dosis y épocas de aplicación para las variables de cultivo asociadas a la calidad.

Tratamiento	Bac	IC	PH	PROT	Ncos					
Testigo	4732	A	0,37	B	78	B	10,6	A	32,1	A
40e	6579	BC	0,36	AB	77	AB	13,5	B	55,6	B
80e	7471	C	0,36	AB	77	AB	14,6	C	67,0	B
40m	7389	C	0,38	B	77	AB	13,6	B	65,8	B
80m	6014	AB	0,35	AB	76	AB	15,4	C	56,7	B
40e-40m	6914	BC	0,34	A	75	A	15,2	C	61,1	B
DMS	1286		0,03		2,6		0,88		13,6	

Letras diferentes indican diferencias significativas para cada variable entre tratamientos. DMS=diferencia mínima significativa ($p < 0,05$)

En general, se observó que, en los tratamientos fertilizados, los valores de las variables REND, ESPm², GRANm² y Bac, fueron superiores que en el control. Contrariamente, para el PMIL, IC y PH el tratamiento control superó a los fertilizados según dosis y momentos. El menor PMIL en los tratamientos fertilizados podría deberse a que el N aplicado aumenta el número de GRANm², generando una dilución del mismo durante el llenado del grano (Loewy, 1990). El tratamiento con mayor REND fue el 40m. En este mismo tratamiento se hallaron la mayor cantidad de GRANm² y GRANESP. Este resultado es diferente a lo que sucede normalmente en la zona de estudio, ya que, en general los tratamientos que poseen mayores rendimientos son los fertilizados en emergencia (Ron et al., 2016), en particular con la mayor dosis. Esto podría atribuirse a que la fertilización en los primeros estadios del cultivo, ya sea en siembra o emergencia, favorece la producción de un mayor número de macollos y espigas (Huespe et al., 2013; Borisov, 2015). Este resultado puede relacionarse a las precipitaciones ocurridas en primavera, más precisamente durante octubre y noviembre. Es importante remarcar que, en estos meses, las precipitaciones cobran relevancia ya que definen la traslocación del N por parte del cultivo (Martínez et al., 2014). Por otro lado, el fraccionamiento de la dosis mayor no presentó diferencias significativas en ninguna variable en comparación a los momentos emergencia o macollaje.

A medida que aumentó la dosis de N, se produjeron incrementos en la PROT, obteniendo el mayor contenido en 80m. El Ncos, demostró diferencias significativas

de los tratamientos fertilizados con respecto al control independientemente de la dosis y momento.

Al tener un diseño con tratamientos se puede hacer una comparación de grupos de medias mediante contrastes ortogonales, (Tabla 5). Se observaron hubo diferencias significativas del tratamiento testigo con los fertilizados en Bac, ESPm², REND, PMIL, GRANm², PROT y Ncos (Tabla 12), quedando demostrada la lógica de que la fertilización favorece el desempeño general del cultivo. No se encontraron diferencias significativas entre momentos de aplicación (emergencia versus macollaje), y ni entre aplicación única versus fraccionada. Esto demuestra que lo recomendable para la zona es hacer una sola aplicación en emergencia, y así evitamos incorporar un costo más por hacer una segunda aplicación en macollaje. Con respecto a la comparación entre dosis de 40 y 80 kg N ha⁻¹, se obtuvieron diferencias significativas en PMIL y PROT, esto nos afirma que las aplicaciones más tardías en el ciclo del cultivo ayudan a mejorar la calidad de la semilla.

El contraste 5, nos demuestra que la dosis se va a comportar de diferente manera en los distintos momentos de aplicación.

Tabla 12. Comparación de grupos de medias mediante contrastes ortogonales

Variable	1. Fertilización	2. Emergencia versus macollaje	3. fraccionamiento vs aplicación única	4. 40 kg N ha ⁻¹ vs 80 kg N ha ⁻¹	5. interacción entre dosis y épocas
Bac	0,0004	0,4604	0,7471	0,6438	0,0179
ESPM²	0,0003	0,2932	0,5931	0,6435	0,0373
REND	0,0042	0,7818	0,7370	0,2826	0,0340
IC	0,4921	0,6000	0,2733	0,0921	0,4649
PMIL	0,0063	0,5402	0,3059	0,0127	0,0408
GRANm²	0,0017	0,8299	0,8907	0,5490	0,0726
GRANESP	0,1567	0,2508	0,3281	0,5154	0,5951
PH	0,1176	0,6406	0,0895	0,2969	0,8315
PROT	<0,0001	0,1460	0,5632	0,0001	0,2856
Ncos	<0,0001	0,9913	0,8831	0,8203	0,0379

Eficiencia de uso del N

En las Figuras 6 y 7 se observan los modelos que maximizan el ajuste de la relación entre REND y Ncos con la dosis de N aplicado en los diferentes momentos. En base a los contrastes y comparación de medias, no se diferenciaron estas relaciones por época de aplicación. En la Figura 6 se aprecia la fase lineal de respuesta en rendimiento a la fertilización para dosis menores a 31 kg N ha⁻¹ maximizando el coeficiente de determinación. La pendiente de la recta constituye una estimación de la eficiencia agronómica en el ensayo (EAGR), siendo la misma de 21 kg grano kg N⁻¹, siendo este valor, elevado en comparación a eficiencias registradas en la zona de estudio (Martínez et al., 2015). El ajuste análogo para Ncos (Figura 7) provee de una estimación de la recuperación aparente del fertilizante (EREC) siendo de 0,72 kg N absorbido kg N aplicado⁻¹ hasta la dosis de 41 kg ha⁻¹.

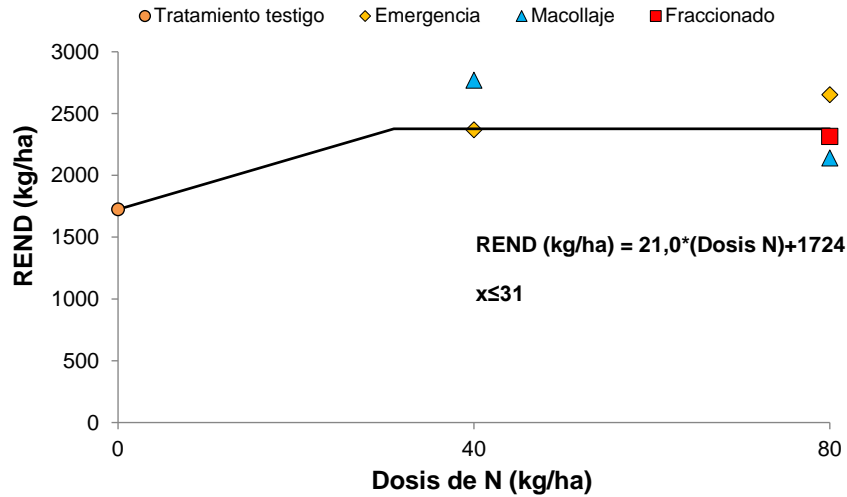


Figura 6: Rendimiento (kg/ha) en función de la dosis (kg/ha).

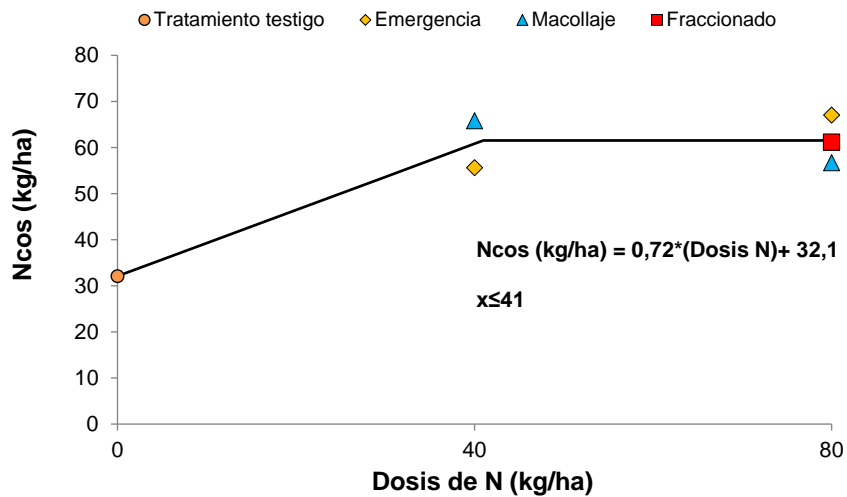


Figura 7: N cosechado (kg/ha) en función de la dosis (kg/ha).

En la Tabla 13 se resumen las estimaciones de EAGR, EREC, EFIS y los requerimientos del cultivo. A partir de las eficiencias EAGR y EREC se puede estimar por calculo la eficiencia fisiológica (EFIS) que fue de 29,2 kg de grano kg N absorbido⁻¹, lo que equivale a un requerimiento (REQ) de 34 kg de N absorbido t de grano producida⁻¹. Es importante recalcar que los valores de REQ obtenidos se encuentren en los rangos usuales citados para trigo por varios autores (Satorre *et al.*, 2003; Álvarez 2007; García & Correndo, 2016).

Tabla 13. Eficiencias de nitrógeno y requerimiento del cultivo

EAGR	EREC	EFIS	REQ
kg grano kg N aplicado ⁻¹	kg N absorbido kg N aplicado ⁻¹	kg grano kg N absorbido ⁻¹	kg N absorbido t de grano ⁻¹
21,0	0,72	29,2	34

Análisis económico

Los componentes del análisis económico se detallan en la Tabla 14. donde figuran los costos adicionales por la aplicación de urea, al igual que los ingresos adicionales que se reciben por los mayores rendimientos en comparación con el testigo y finalmente, el margen bruto que resulta de restar ambas variables. Se contempla que en todos los tratamientos a excepción de 80m el margen bruto fue positivo y consideradamente mayor que el testigo, por ende, los ingresos adicionales obtenidos por aumentos en rendimiento, comparado con el testigo, fueron superiores a los costos adicionales del fertilizante y de la aplicación en los tratamientos fertilizados. Los márgenes brutos dieron la mayoría positivos excepto el tratamiento de 80m.

Se estimó la relación (R) de kg grano kg N aplicado⁻¹ obteniéndose un valor de 6,7; 1,3 puntos por debajo del R histórico de 8 kg grano kg N⁻¹ (Álvarez, 2008). En cuanto a la dosis óptima económica (DOE) del modelo lineal utilizado para describir la respuesta en rendimiento a la dosis aplicada, se observa que en el rango de respuesta (hasta los 31 kg N ha⁻¹) cada kg de N aplicado tiene un costo de 6,7 kg de trigo y una respuesta de 21 kg de grano, correspondiendo la DOE a los 31 kg de N ha⁻¹, dando una ganancia neta máxima de 400 kg de trigo ha⁻¹.

Tabla 14. Margen bruto (kg ha^{-1}) de los tratamientos fertilizados en función del tratamiento testigo.

TRATAMIENTOS	REND	Respuesta REND sobre testigo		En función del testigo		
		kg ha^{-1}	en %	COSTO Adicional (\$ ha^{-1})	INGRESO Adicional (\$ ha^{-1})	Margen Bruto (\$ ha^{-1})
Testigo	1725	0	0	0	0	0
40e	2368	643	37,3	4988	11715	6727
80e	2653	928	53,8	9087	16908	7821
40m	2769	1044	60,5	4988	19022	14034
80m	2141	416	24,1	9087	7579	-1507
40e+40m	2314	589	34,1	9976	10732	756

Conclusiones

Para el año en estudio, la producción del cultivo de trigo superó al promedio histórico de la zona, lo cual podría atribuirse a las precipitaciones registradas durante los meses de primavera, las cuales son fundamentales para la producción de granos. La fertilización nitrogenada mejoró considerablemente el desempeño del cultivo de trigo, tanto en el rendimiento como en la calidad, esto nos afirmaría la primera hipótesis planteada.

Con respecto al fraccionamiento de la dosis se puede afirmar que no mostró mejores resultados comparándola con la aplicación de la dosis única, de este modo rechazamos la segunda hipótesis planteada.

En base a lo estudiado, con condiciones meteorológicas similares a las del año en estudio, lo recomendable para la zona es hacer una aplicación única en emergencia, ya que, disminuiríamos los costos por no tener que hacer una segunda aplicación.

Bibliografía

- Abbate, E. P & F. H. Andrade. 2006. Fertilización de cultivos. Trigo. En Echeverría, H. E. y F. O. García. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Pp 233- 249. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Alvarez, R. 2007. Balance de Nitrógeno en el cultivo de Trigo tomado de: <https://www.engormix.com/agricultura/articulos/nitrogeno-en-trigo-t27047.htm>
- Alvarez, R. 2008. Análisis de la conveniencia económica de utilizar umbrales fijos para recomendar la fertilización nitrogenada y fosforada de trigo. VII Congreso Nacional de trigo, Santa Rosa, La Pampa, Argentina, 2-4 julio.
- Berardo, A. 1994. Manejo y fertilización del trigo en la zona sur. Tomado de: <https://www.laboratoriofertilab.com.ar/Trabajos/Trigo2.pdf>
- Borisov, J.A. 2015. Respuesta del trigo a nitrógeno bajo condiciones de buena humedad en Colonia Napostá. Trabajo final para el grado de ingeniero agrónomo. Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- Calvo, N. R.; H. Echeverría, P. Barbieri y H. S. Rozas. 2006. Nitrógeno y azufre en trigo: ¿Rendimiento y proteína?. *Informaciones Agronómicas* 30: 6-11.
- Cantamutto, M.A.; F. Mockel, R. Rosell, R. Martínez, M.R. Landriscini, L. Gallez & G. Gullace. 1986. Factores que condicionan la respuesta del trigo a la fertilización con nitrógeno y fósforo en el sur de la provincia de Bs.As. Actas XI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Neuquen, Argentina.
- Campo, A. M.; M Ramos y P. Zapperi. 2009. Análisis de las variaciones anuales de precipitación en el Suroeste Bonaerense, Argentina. XII Encuentro de Geógrafos de América Latina.
- Carestía, G.; L., Escudero; J., Frascina & D., Gómez. 2017. Efecto de la fecha de espigazón sobre el rendimiento y sus componentes en distintas especies de cereales invernales. EEA Marcos Juárez. Informe de Actualización Técnico N° 7: 34-38.
- Colla, C. 2013. Respuesta del trigo al nitrógeno en un sitio con alta disponibilidad inicial. Trabajo final para el grado de ingeniero agrónomo. Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- Darwich, N. A. y G. A Darwich, 2004. Estrategias de fertilización para mejorar el rinde y la calidad industrial del trigo. Actas del Congreso A Todo Trigo.
- Di Rienzo, J. A.; F. Casanoves; M. G. Balzarini; L. Gonzales; M. Tablada y C. W. Robledo. InfoStat, versión 2008. Grupo infoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

- Díaz-Zorita, M. 2000. Efecto de dos momentos de aplicación de urea sobre la producción de grano de trigo en Drabble (Buenos Aires, Argentina). *Ciencia del Suelo* 18:125-131.
- Divito, G. A. & F. O. García, 2017. Manual del cultivo de trigo.
- Fernandez, J. & J. C. Rondinia, 2004. Historia Argentina tomo 1 (1810-1930) Segunda parte (1853-1930) Capitulo 3. Universidad Nacional del Litoral.
- Galantini, J.; M. R. Landriscini; J. Iglesias J; A. Miglierina & R. Rosell. 2000. The effects of crop rotation and fertilization on wheat productivity in the Pampean semiarid region of Argentina. *Soil Till. Res.* 53:137-144.
- García, F. O. 2003. Balance de nutrientes en la rotación: impacto en rendimientos y calidad de suelo. Tomado de: https://www.produccion-animal.com.ar/suelos_ganaderos/12-balance_nutrientes_en_la_rotacion.pdf
- García, A. 2004. Manejo de la fertilización con nitrógeno en trigo y su interacción con otras prácticas agronómicas. Serie Técnica 14 INIA. Tomado de: <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/111219240807141622.pdf>
- García, F. O. & A. A. Correndo. 2016. Cálculo de requerimientos nutricionales. IPNI (International Plant Nutrition Institute). Tomado de: <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>
- Gasparotto, G. 2014. Respuesta agronómica en trigo a diferentes densidades de siembra en lotes con ondulaciones. Universidad Nacional de Cordoba. 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>
- Gutiérrez, M. 2013. Respuesta a nitrógeno en trigo bajo severo estrés hídrico. Trabajo final para el grado de ingeniero agrónomo. Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- Huespe, D.; M. R. Landriscini y J. A. Galantini. 2013. Fertilización con N y S en trigo. Rendimiento y calidad del grano. *Revista AAPRESID Ciencia y experiencia para una siembra directa sustentable en los ambientes frágiles del S y SO Bonaerense*. J.A Galantini editor.
- Jáuregui, F. 2014. Efecto de dosis y momento de fertilización nitrogenada en trigo. Trabajo final para el grado de ingeniero agrónomo. Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.

- Kiessling, R. J.; J. M. Martínez; M. Toribio y M. M. Ron. 2013. Fertilización nitrogenada en trigo en el Partido de Bahía Blanca (Provincia de Buenos Aires). Simposio Fertilidad 2013. "Nutrición de cultivos para la intensificación productiva sustentable" Rosario 22 y 23 de mayo 6 páginas.
- Loewy, T. 1990. Fertilización nitrogenada del trigo en el sudoeste bonaerense. II. Respuesta a la calidad del grano. Ciencia del Suelo 8: 57-63.
- Loewy T.; F. A. Milano; G. R. Angeles; M. S. Saldungaray; D. H. Campaña y M. A. Álamo. 2015. Buenas prácticas agrícolas con desarrollo local para el sudoeste bonaerense. EDIUNS, Editorial de la Universidad Nacional del Sur. Tomado de: <http://www.proyectodepais.com.ar/wp-content/uploads/2016/07/BPA.pdf>
- Martínez J. M.; J. A. Galantini; M. R. Landriscini & M. Duval, 2014. Momentos de fertilización nitrogenada: influencia sobre las eficiencias del nitrógeno y del agua. AgroUNS 22: 5-9
- Martínez J. M.; J. A. Galantini & M. R. Landriscini, 2015. Eficiencia en el uso del nitrógeno del trigo en la región semiárida de Buenos Aires (Argentina): efectos de la dosis y momentos de aplicación. Agriscientia 32: 15-27.
- Minoldo, G. 2010. Impacto de largo plazo de diferentes secuencias de cultivos del sudoeste bonaerense sobre algunas propiedades químicas del suelo y la productividad del trigo Tesis de Magister en Cs. Agr., UNS. 154 pp.
- Miralles, D. J. 2004. Consideraciones sobre ecofisiología y manejo de trigo. Información técnica de trigo. Campaña 2004. Publicación Miscelánea Nº 101 Tomado de: http://rafaela.inta.gov.ar/info/miscelaneas/101/trigo2004_n1.pdf
- Miralles, J. M. & F. G. González, 2009. El trigo en Argentina: Perspectivas ecofisiológicas del pasado, presente y futuro para aumentar el rendimiento. Tomado de: https://www.agro.uba.ar/noticias/sites/default/files/miralles_aapresid.pdf
- Miralles, D.J.; F.G., González; L.G., Abeledo; R.A., Serrago; I., Alzueta; G.A., García; R.P., de San Caledonio & P., Lo Valvo. 2014. Manual de trigo y cebada para el Cono Sur: procesos fisiológicos y bases de manejo. - 1a ed. -Buenos Aires: Orientación Gráfica Editora.
- Molfese, E.; M. Seghezzo & V. Astiz, 2014. Relevamiento de la calidad de trigo pan, en lotes de producción del centro sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Tomado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_barrow_-_relevamiento_de_calidad_trigo_pan_en_lo.pdf

- Mulvaney, R.L. 1996. Nitrogen- Inorganic forms. In: Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods (D.L. Sparks et al., ed.). SSSA Book Ser. 5. Soil Science Society of America, Madison, WI. Pp. 1123-1184.
- Orden, L; M. E. Mandolesi; R. J. Kiessling y M. M. Ron. 2011. Variabilidad espacial de fertilidad química del suelo en un diseño de bloques. Spanish Journal of Soil Science 1: 54-69.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2021. Situación alimentaria mundial. Tomado de: <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/es/>
- Ritacco, M., 2003: Radioinsectación de cereales almacenados. Revista Argentina Nuclear. Edición No. 86. Tomado de : http://www.ambiente-ecologico.com/ediciones/2003/086_01.2003/086_Publicaciones_ArgentinaNuclear.php
3
- Ron, M. M. y T. Loewy. 1999. Modelo de fertilización nitrogenada y fosforada para trigo en el Sudoeste Bonaerense, Argentina. Ciencia del Suelo 18: 44-49.
- Ron, M. M. y T. Loewy. 2000. Factores de eficiencia del N aplicado en trigo, a la siembra o macollaje. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina.
- Satorre, E. H; R.L., Benech Arnaldo; G.A., Slefer; E.B., De La Fuente; D.J., Miralles; M.E., Otegui & R., Savin. 2003. Producción de Grano, bases funcionales para su manejo. Editorial Facultad de Agronomía.
- USDA, 2020. Producción de trigo. Tomado de: <https://www.indexmundi.com/agriculture/?producto=trigo&variable=produccion&l=es>
- Vanzolini, J. I. & A. Logiúdice, 2016. Red de evaluación de cultivares de trigo en Hilario Ascasubi, resumen campañas 2012/2015. Tomado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_h_ascasubi-evaluacion.cultivares.trigo_2012-15_inf_tec_no_50.pdf
- Zadoks, J. C.; T. T. Chang & C. F. Konzak. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. Weed Research 14: 415-421.
- Zotelo, C. 2012. Variabilidad climática y ciclos naturales. Tomado de : http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/27824/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y