

¿CÓMO AFECTA LA PROFUNDIDAD DEL SUELO AL ÍNDICE DE SUFICIENCIA DE NITRÓGENO EN LA CEBADA Y EL TRIGO?

Marcelo Jose Lopez de Sabando¹, Martín Diaz-Zorita².

Sabando.marcelo@inta.gob.ar. (1) AER INTA Tandil, Rodriguez 370, Tandil, Buenos Aires, Argentina.
(2) Universidad Nacional de La Pampa, RN 35 km 334, Santa Rosa, La Pampa, Argentina.

**Trabajo presentado al
Segundo Congreso Latinoamericano de Agricultura de Precisión
(CLAP2022)
30-31 de Marzo y 1 de Abril de 2022 Manfredi, Córdoba, Argentina**

Resumen. Los objetivos fueron: i) comparar los cambios de rendimientos en grano, índice de suficiencia de nitrógeno (ISN) y dosis óptima económica de nitrógeno (DOEN) según la profundidad del suelo entre cultivos de cebada y de trigo; ii) evaluar el efecto de la variación de la relación precio grano y precio de fertilizante en ISN. Se llevaron a cabo 16 ensayos de fertilización con N en el sudeste de la región pampeana. En cada sitio se realizó un experimento en cebada y en trigo según dos zonas de profundidad de suelo contrastantes. El cultivo de cebada mostró rendimientos mayores, mayores incrementos de rendimiento asociados a la fertilización con nitrógeno, menor interacción entre la profundidad de los suelos y la fertilización y DOEN independientes del sitio y la profundidad de los suelos. Trigo mostró menores rendimientos y mayor interacción entre la profundidad de los suelos y la fertilización. Al considerar los DOEN en trigo se observó efecto sitio y efecto profundidad de los suelos. En cebada y en trigo las diferencias de disponibilidad de nitrógeno en relación a los DOEN explicaron las variaciones del ISN. La DOEN presentó rango de valores de ISN de 0,95 a 0,97 en cebada y de 0,89 a 0,99 en trigo. La profundidad de los suelos y la relación de precios mostraron efectos sobre ISN. Los suelos profundos alcanzaron DOEN con mayores niveles de ISN que los suelos someros. Los resultados muestran diferencias en la DOEN según campaña y sitio y requieren de herramientas como ISN para ajustar decisiones de manejo durante el ciclo de los cultivos.

Palabras clave. TRIGO, CEBADA, FERTILIZACIÓN CON NITRÓGENO, PROFUNDIDAD DE SUELOS.

Introducción

La cebada (*Hordeum vulgare* L.) y el trigo (*Triticum aestivum* L.) son los cultivos de cereales de invierno con mayor superficie en el mundo. Para ambos cultivos, el nitrógeno (N) es el macronutriente que limita con mayor frecuencia sus rendimientos de grano (GY) (De Oliveira Silva et al., 2020; Sadras y Calderini, 2020). Esto se debe a que los suministros de N de los suelos no son suficiente para satisfacer la alta demanda de N de los cultivos, desde el macollaje hasta la antesis, para alcanzar el GY en condiciones de secano (Malhi et al., 2006). Dado que el N es un nutriente con alta movilidad en los suelos, la sincronización entre la demanda de N del cultivo y el suministro de N (N del suelo + N de fertilizante) es la clave para lograr una alta eficiencia de recuperación de N (NRE) y de uso de N (NUE) (Meisinger y Delgado, 2002; Crews y Peoples, 2005). Las eficiencias bajas en N dan como resultado externalidades ambientales negativas y pérdidas económicas (Ladha et al., 2005). Entonces, para lograr la sincronización de N es necesario tener métodos de diagnóstico N adecuados.

El método de diagnóstico de N más extendido para evaluar el suministro de N de los suelos para la cebada y el trigo es la estimación de la demanda de N a partir de los rendimientos esperados y la determinación de N-nitrato ($\text{NO}_3 - \text{N}$) antes de la siembra (Taylor et al., 1974; Myers, 1984; Echeverría et al., 2001; Gonzalez Montaner et al., 2003; Barbieri et al., 2012; Bell et al., 2013). También se ha demostrado que la incorporación de la determinación anaeróbica de N (N_{an}) en un modelo de $\text{NO}_3 - \text{N}$ mejora la predicción del GY del trigo (Reussi Calvo et al., 2013) porque la determinación de N_{an} es un buen estimador del N potencialmente mineralizable durante el ciclo de cultivo (Reussi Calvo et al., 2018). No obstante, todas estas metodologías se basan en el GY esperado en el momento de la siembra, cuando existe una alta incertidumbre respecto a las condiciones meteorológicas (radiación, temperatura y precipitaciones) durante el período crítico del cultivo. Además, no consideran otros factores que afectan la NRE y la NUE, como la capacidad de retención de agua del suelo (profundidad del suelo), la posición del relieve y la lixiviación de N.

Por lo tanto, se ha informado que las metodologías inteligentes de manejo de N, que toman en cuenta los diagnósticos iniciales de N de las pruebas de suelo y también las mediciones posteriores directas o indirectas del estado de N en el cultivo, permiten ajustes de N durante la temporada de crecimiento del cultivo mejorando la NRE y la NUE (Samborski et al., 2009). A su vez, el uso de mediciones del estado de N de cultivos en relación con otras mediciones del estado de N de cultivos en áreas sin deficiencias de N, llamado índice de suficiencia de N (ISN), se adopta ampliamente para minimizar las variaciones causadas por genotipos, estructuras de cultivos, enfermedades y otros nutrientes (Barker and Sawyer, 2010; Clay et al., 2012). En ese sentido, la medición de la concentración de N en los tejidos vegetales y el uso de curvas de dilución de N es una metodología precisa para evaluar el estado de N de los cultivos de cebada y de trigo (Zhao, 2014; Yin et al., 2018). Sin embargo, esta determinación requiere exploración de campo, muestreo de material vegetal y análisis de laboratorio. Una metodología que permite obtener resultados más rápidos de observaciones de N de cultivos, sin necesidad de muestreo y análisis de laboratorio, es el uso del clorofilómetro portátil (Spaner et al., 2005; Reussi Calvo et al., 2015; Scharf et al., 2006; Schepers et al., 1992; Ziadi et al., 2008). Sin embargo, esta metodología todavía requiere exploración y levantamiento de campo. En cambio, la detección remota multiespectral, a través de imágenes de satélite o vehículos no tripulados, permite observaciones rápidas y precisas del estado N de grandes áreas. El índice más utilizado para la detección remota de N es el Índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI), calculado utilizando las longitudes de onda del rojo ($650 \pm 10 \text{ nm}$) y del infrarrojo cercano ($770 \pm 15 \text{ nm}$) (Huang et al., 2021). El NDVI es un buen estimador de las deficiencias de N y la respuesta de GY a la fertilización con N en varios cultivos como la cebada y el trigo (Melchiori et al., 2007; Reussi Calvo et al., 2020).

La tasa de fertilizante puede definirse con el objetivo de maximizar los rendimientos o el retorno económico del cultivo. Cuando se define como objetivo el beneficio económico la dosis mínima de

fertilizante que permite alcanzar el máximo beneficio económico es la dosis óptima económica de nitrógeno (DOEN). Este enfoque toma en cuenta las relaciones biológico-productivo y económico insumo-producto (cita). Varios autores han reportado una buena relación entre el ISN y el diferencial de N (déficit o exceso de N) con respecto a la dosis económica óptima (dDOEN) (Scharf et al., 2006; Hawkins et al., 2007).

La relación entre el ISN y el dDOEN ha permitido ajustar los modelos de diagnóstico y definir valores umbral de ISN para realizar ajustes de N durante la temporada de crecimiento del cultivo tanto para el trigo (Reussi Calvo et al., 2015) como para la cebada (Reussi Calvo et al., 2020). Sin embargo, estos trabajos se limitaron a suelos profundos (Typic Argiudolls; USDA Soil Taxonomy, 2014) y en campañas de buenas condiciones meteorológicas y, por lo tanto, de alto GY. La producción de trigo y de cebada se realiza en ambientes con variaciones en el relieve y la profundidad del suelo, entre y dentro campos (Calviño y Sadras, 2002). En sudeste de región Pampeana las variaciones en la profundidad del suelo vienen dadas por la presencia de horizontes Petrocálcicos (capas de tosca de carbonato de calcio), generalmente asociados con posiciones de campo de lomas (Kuznetsova y Khokhlova, 2015; Pazos and Mestelan, 2002). Para los cultivos de secano que crecen en esos campos, la profundidad del suelo es el factor clave que limita tanto la capacidad de retención de agua del suelo como el crecimiento de las raíces y, por lo tanto, el GY (Calviño y Sadras, 2002). Se esperan respuestas GY diferenciales a la fertilización con N dependiendo del ambiente, asociadas con la profundidad del suelo y las condiciones meteorológicas (Ej. Precipitaciones) para el ajuste de GY. Esto podría determinar diferencias en la relación entre ISN y dDOEN entre áreas con diferentes profundidades de suelo y entre cultivos.

Otra variable que puede afectar al ISN y al dDOEN es el costo del fertilizante y el precio de los granos. El uso de una relación precio promedio insumo-producto podría ser una simplificación técnica aceptable, adecuada para economías estables. Sin embargo, esta relación varía según precios internacionales, tipos de cambio e impuestos.

Los trabajos disponibles, que relacionan ISN y dDOEN, no exploran condiciones de variabilidad de producción asociados a suelos poco profundos. Además, las relaciones insumo-producto no han sido analizadas bajo el rango de variación observado en los últimos años. Por lo tanto, los objetivos de este estudio fueron: i) comparar los cambios de GY, ISN y DOEN en la profundidad del suelo entre cultivos de secano de cebada y de trigo; ii) evaluar el efecto de la variación de la relación precio grano y precio de fertilizante N en el ISN según cultivo y profundidad de los suelos.

Materiales y métodos

Se llevaron a cabo 16 ensayos de fertilización con N mediante labranza cero en el sureste de la región pampeana. En cada sitio se realizó un experimento en cebada y en trigo según dos zonas de profundidad de suelo contrastantes: i) suelos profundos: > 100 cm, Typic Argiudolls (USDA Soil Taxonomy, 2014), y ii) suelos poco profundos: <50 cm, Petrocalcic Hapludolls y Petrocalcic Argiudolls (Tabla 1). En cada lote, cultivo y zona de profundidad del suelo, se llevó a cabo un ensayo en un diseño de disposición de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Los tratamientos fueron seis niveles de N (0, 40, 80, 120, 160 y 200 kg N ha⁻¹) como urea (46% N) al voleo aplicada después de la siembra. En todos los ensayos la soja fue el cultivo antecesor y las prácticas de manejo aplicadas (fecha de siembra, densidad de planta y control de plagas, malezas y enfermedades) corresponden a cultivos de alta producción. Al momento de la siembra, todas las parcelas fueron fertilizadas con 30 kg ha⁻¹ de fósforo (P) y 15 kg ha⁻¹ de azufre. El tamaño de la parcela era de 20 m² (2 metros de ancho por 10 metros de largo).

En el momento de la siembra, se tomaron muestras compuestas de suelo. De 0 a 20 cm de profundidad del suelo, textura (Walter, et al., 1978), carbono orgánico (Nelson y Sommers, 1996), P extraíble Bray-

1 (Bray y Kurtz, 1954), Nan (Gianello y Bremner, 1986) , y pH (en agua de reacción 1: 2.5 (potenciometría). Además, se determinó N-NO₃ de 20 a 60 cm (Bremmer, 1996). El contenido de N-NO₃ (Bremmer, 1996) y la densidad aparente del suelo (Blake y Hartge, 1986) se determinaron en capas de 20 cm hasta 60 cm de profundidad cuando la profundidad del suelo lo permitía. El aporte de N al suelo se estimó mediante la suma de los cocientes entre la densidad aparente del espesor y el contenido de N-NO₃.

En la etapa Z31 (Zadoks et al., 1974), el NDVI se evaluó utilizando el Green Seeker (GS) (Ntech Industries 2007). Las medidas se tomaron en el centro de las parcelas, a una velocidad constante de 1 m s⁻¹ y una distancia del dosel de 0,60 m. El ISN se calculó considerando el valor del NDVI de cada parcela en relación al valor del NDVI de la parcela con máxima fertilización N (200 kg N ha⁻¹).

$$\text{ISN} = \text{NDVI}_o / \text{NDVI}_{\text{suf}} \dots\dots\dots \text{ec.1}$$

donde ISN es índice de suficiencia de nitrógeno, NDVI corresponde al valor de cada parcela y NDVI_{suf} es el valor de parcela de máxima fertilización con nitrógeno correspondiente al bloque.

En la madurez fisiológica, el GY se determinó mediante recolección mecánica de la porción central de cada parcela. Los GY se ajustaron a modelos de respuesta cuadrática de acuerdo con los niveles de nitrógeno disponible (Nd).

$$\text{Nd} = \text{Nsu} + \text{Nfe} \dots\dots\dots \text{ec.2}$$

donde Nsu es nitrógeno de nitratos en los primeros 0,6 m de suelos en kg ha⁻¹ y Nfe es nitrógeno aplicado como fertilizante en kg ha⁻¹. Los niveles de Nd para alcanzar los rendimientos correspondientes a la DOEN se estimaron cuando la primera derivada de los modelos cuadráticos correspondientes fue igual a la relación insumo producto. Se utilizaron las siguientes relaciones insumo producto: 4, 6 y 10, correspondientes a escenarios de insumos con precios bajos o productos con precios altos en la relación de 4, y con escenarios de insumos con precios altos o productos con precios bajos en la relación de 10. Con esta información se calcularon los rendimientos máximos económicos (RE_{max}). Los rendimientos mínimos (R_{min}) se estimaron a partir de la ordenada al origen. Para cada lote y tipo de suelo se determinó DOEN. Para cada tratamiento se calculó la diferencia de la dosis óptima económica (dDOEN) como

$$\text{dDOEN} = \text{Nd} - \text{DOEN} \dots\dots\dots \text{ec.3}$$

donde Nd es nitrógeno disponible en cada tratamiento y DOEN es el nivel de Nd correspondiente a la dosis óptima económica de cada lote y tipo de suelos. Se ajustó el modelo de correlación entre dDOEN e ISN. Se determinó para cada cultivo, lote y profundidad de suelos los valores de ISN correspondientes a DOEN (dDOEN = 0).

Las propiedades de suelos y de cultivos se analizaron mediante análisis de componentes principales y modelos de regresión lineal incorporando términos lineales, cuadráticos e interacciones que tuvieran como variables dependientes el incremento de rendimiento y el rendimiento. En todos los casos se utilizaron ANVA protegidos (p<0,10) y pruebas de diferencias de medias de Fisher (Di Rienzo, et al., 2011).

Resultados

Propiedades de suelos

Los sitios evaluados presentaron similar clase textural (franco arcillosa), rangos de pH de 5,5 a 7,1, materia orgánica de 48 a 68 g kg⁻¹, nitrógeno anaeróbico de 61 a 130 mg kg⁻¹, fósforo extractable de 2,9 a 30,2 mg kg⁻¹ y N de nitratos de 24 a 122 kg ha⁻¹ (Tabla 1). En la mayoría de los sitios los niveles de N de nitratos fueron mayores en los suelos profundos en relación a los suelos someros. El resto de las propiedades de suelos evaluadas mostraron diferencias según sitios y sin asociación con la profundidad de los suelos. Los valores de propiedades de los suelos son representativos de los encontrados por otros autores en la región de estudios (Sainz Rozas et al. 2011; Studdert et al. 2015).

Tabla 1: Descripción de localización de experimento según variables de suelos. Año, sitio, profundidad suelo hasta horizonte petrocálcico y propiedades superficiales de suelos. MO = materia orgánica. Nan= nitrógeno anaeróbico. Pe = Fósforo extractable.

Año	Sitio	Profundidad horizonte petrocálcico	Arcilla	Limo	Arena	pH	MO	Nan	Pe	N-Nitratos	
		(m)									(g kg ⁻¹)
		0-100 cm	----- 0-20 cm -----					0-60 cm			
Cebada											
2013	El Parque	>100,00	280	340	380	5,6	48	61,6	8,8	83,07	
		0,40	34	24	42	6,5	53	95,8	8,6	56,16	
2013	Limache	>100,00	360	350	290	5,8	67	130,2	20,4	122,85	
		0,40	33	36	31	5,8	65	117,3	13,3	91,00	
2014	El Parque	>100,00	320	300	380	6,7	59	78,9	19,4	34,71	
		0,40	34	36	30	5,6	61	66,6	18,8	24,96	
2014	San Lorenzo	>100,00	270	390	340	5,6	64	62,7	22,7	53,04	
		0,40	31	36	33	5,5	53	75,9	12,3	35,88	
Trigo											
2013	El Parque	>100,00	300	360	340	5,9	54	92,4	7,5	88,40	
		0,20	26	24	50	7,2	75	100,5	2,9	48,88	
2013	Limache	>100,00	310	270	420	5,7	51	87,1	14,6	64,87	
		0,27	36	30	34	7,1	60	114,2	8,9	35,89	
2014	El Parque	>100,00	280	370	350	5,7	68	76,7	4,6	33,93	
		0,40	30	25	45	5,7	68	86,2	6,6	49,63	
2014	San Lorenzo	>100,00	310	380	310	5,7	67	83,7	30,2	58,89	
		0,40	30	38	32	5,6	57	68,0	26,1	55,64	

Rendimientos por cultivo zona y nivel de nitrógeno

Los rangos de rendimientos explorados fueron diferentes según el cultivo y la profundidad de los suelos (Tabla 2). En cebada los rangos rendimientos fueron de 2870 a 10641 kg ha⁻¹ con promedio de 6087 kg ha⁻¹. Según profundidad de los suelos, se observó que en los sitios de suelos profundos el rango

fue de 4080 a 10641 kg ha⁻¹, mientras que en los sitios de suelos someros los rendimientos observados presentaron rango de 2870 a 9830 kg ha⁻¹. Los rendimientos promedio fueron 6462 y 5712 kg ha⁻¹ según suelos profundos y someros, respectivamente. En trigo se observaron rendimientos menores que en cebada. Las mayores diferencias se observaron en los rendimientos máximos y promedio de los suelos someros. El rango de rendimientos fue de 2339 a 9079 kg ha⁻¹, con promedio de 5262 kg ha⁻¹. En los sitios de trigo con suelos profundos los rangos de rendimientos fueron de 2339 a 9079 kg ha⁻¹ con promedio de 5894 kg ha⁻¹. En los sitios someros los rendimientos observados fueron de 2452 a 7441 kg ha⁻¹ con promedio de 4632 kg ha⁻¹.

La fertilización con nitrógeno permitió en 14 de los 16 sitios evaluados incrementar los rendimientos. En dos sitios de suelos someros, uno en trigo y otro en cebada, los datos disponibles no muestran diferencias de rendimientos según fertilización con nitrógeno. En cebada se observó incrementos de rendimientos promedio asociados a la fertilización de 3294 y 3494 kg ha⁻¹ según sitios de suelos profundos y suelos someros, respectivamente. Mientras que, en trigo, se observaron incrementos de rendimientos promedio por la fertilización de 2453 y 1323 kg ha⁻¹ según suelos profundos y someros, respectivamente.

Los efectos de la fertilización con nitrógeno sobre los rendimientos mostraron interacción con la profundidad de los suelos principalmente en el cultivo de trigo. De los 4 sitios evaluados en 3 se observó interacción entre profundidad de suelos y fertilización con nitrógeno. En cebada, 3 de los 4 sitios evaluados los efectos de la fertilización con nitrógeno sobre los rendimientos fueron independientes de la profundidad de los suelos (Tabla 3).

Al analizar el efecto de la fertilización con nitrógeno en cada cultivo, sitio y profundidad de suelo se observó que en cebada la dosis mínima de fertilización que permitió rendimientos sin diferencia con niveles de fertilización mayores fue de 60 y 75 kg de N ha⁻¹ en suelos profundos y de 0, 75 y 120 kg N ha⁻¹ en suelos someros dependiendo del sitio. En trigo se observó similares resultados en los suelos profundos con niveles óptimos de 60 y 75 kg N ha⁻¹ según sitio, y menores niveles en suelos someros con niveles de 0, 60 y 75 kg N ha⁻¹ como óptimos (Tabla 2).

Los rendimientos de trigo y de cebada se ajustaron a modelos cuadráticos decrecientes según los niveles de nitrógeno disponible (suelo más fertilizante) para cada sitio y tipo de suelo. A mayores niveles de nitrógeno disponible se observaron rendimientos mayores hasta un nivel donde los rendimientos comenzaron a reducirse. Los niveles de nitrógeno disponible para alcanzar la dosis óptima económica de nitrógeno según diferentes relaciones de insumos y productos mostraron diferencias según cultivo. En cebada los niveles de nitrógeno disponible presentaron principalmente diferencias entre sitios, con independencia de la profundidad de los suelos. A modo de ejemplo, con relación de insumo y producto igual a 4, el rango de nitrógeno disponible óptimo fue de 137 a 265 kg N ha⁻¹. Mientras que en trigo los niveles de nitrógeno disponible mostraron tanto diferencias entre sitios como entre la profundidad de los suelos en cada sitio. Considerando una relación de insumos y productos igual a 4, en suelos profundos la dosis óptima se encontró en niveles de nitrógeno disponible de 244 a 213 kg N ha⁻¹ y en suelos someros los niveles de nitrógeno disponible fueron de 127 a 180 kg N ha⁻¹ (Tabla 4).

Para las condiciones evaluadas se observaron diferencias en la producción y uso de nitrógeno entre cebada y trigo. El cultivo de cebada mostró rendimientos mayores, mayores incrementos de rendimiento asociados a la fertilización con nitrógeno, menor interacción entre la profundidad de los suelos y la fertilización con nitrógeno y, además, niveles de dosis óptima económica de nitrógeno independientes del sitio y la profundidad de los suelos. El cultivo de trigo mostró comportamiento diferente al de cebada, menores rendimientos y mayor interacción entre la profundidad de los suelos y la fertilización con nitrógeno. Al considerar los niveles óptimos económicos de nitrógeno en trigo también se observó efecto sitio y efecto profundidad de los suelos, siendo necesario mayores niveles de nitrógeno para alcanzar la dosis óptima requeridos en los suelos profundos en relación a los suelos someros.

Tabla 2: Efecto de profundidad de suelos, fertilización con nitrógeno e interacción de la profundidad de los suelos con la fertilización para trigo y cebada según campaña y sitio determinado por los valores de p de análisis de la varianza.

Cultivo	Año	Sitio	Profundidad horizonte	Nitrogeno	Profundidad horizonte*Nitrogeno
Cebada	2013	El Parque	0,0001	0,0086	0,7462
		Limache	0,8239	0,0001	0,9439
	2014	El Parque	0,0013	0,0001	0,8742
		San Lorenzo	0,0003	0,0001	0,0783
Trigo	2013	El Parque	0,0482	0,0001	0,6673
		Limache	0,0001	0,0001	0,0014
	2014	El Parque	0,0130	0,0004	0,0641
		San Lorenzo	0,0001	0,0001	0,0023

Tabla 3: Rendimientos de trigo y de cebada según campaña, sitio, profundidad de suelos y nivel de fertilización con nitrógeno. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de fertilización según test de Tukey (p=0,10).

Año y sitio	Profundidad de suelo	Rendimiento (kg ha ⁻¹)						Promedio
		0	Fertilización con nitrógeno (N ha ⁻¹)				200	
		Cebada						
2013	El Parque	Profundo	4524b	5292a	5657a	5625a		5274
		Somero	3669a	4081a	4486a	4203a		4110
		Promedio	4097	4686	5071	4914		
	Limache	Profundo	4541b		9000a	9297a	9689a	8132
		Somero	4395b		8959a	9468a	9498a	8080
		Promedio	4468		8979	9383	9593	
2014	El Parque	Profundo	4309b	6312ab	7688a	7257a		6391
		Somero	3119b	4618b	6671a	6170a		5145
		Promedio	3714	5465	7179	6713		
	San Lorenzo	Profundo	4819c	6454ab	6733a	6193b		6050
		Somero	4150c	5421b	6482a	5994ab		5512
		Promedio	4485	5938	6607	6094		
		Trigo						
2013	El Parque	Profundo	4552b		6591a	7736a	7701a	6645
		Somero	4340b		6290a	6856a	6653a	6035
		Promedio	4446		6440	7296	7177	
	Limache	Profundo	4669b		6989a	7742a	7855a	6814
		Somero	4357b		5202a	5408a	5442a	5102
		Promedio	4513		6095	6575	6649	
2014	El Parque	Profundo	2664b	3657ab	5047a	5267a		4159
		Somero	2950a	3346a	3956a	3634a		3471
		Promedio	2807	3501	4502	4450		
	San Lorenzo	Profundo	4475c	6517ab	6117b	7347a		6114
		Somero	3171b	3965a	4536a	4427a		4025
		Promedio	3823	5241	5327	5887		

Tabla 4: Variables de producción de trigo y cebada: nitrógeno disponible necesario según dosis óptima económica, rendimiento en grano y eficiencia de uso de nitrógeno según relaciones de precio de insumos (fertilizante con nitrógeno) y de producto (grano de trigo y cebada), campaña, sitio y profundidad de los suelos. I:P= Relación insumo producto.

Localización		Variables de producción									
Año y sitio	Profundidad de suelos	I:P=4			I:P=6			I:P=10			
		Nitrógeno disponible	Rendimientos	Eficiencia de uso de nitrógeno	Nitrógeno disponible	Rendimientos	Eficiencia de uso de nitrógeno	Nitrógeno disponible	Rendimientos	Eficiencia de uso de nitrógeno	
0-100 cm		----- kg ha ⁻¹ -----	kg grano	kg	----- kg ha ⁻¹ -----	kg grano	kg	----- kg ha ⁻¹ -----	kg grano	kg	
		nitrogeno ⁻¹									
Cebada											
2013	El Parque	>100,00	165	5620	13	147	5530	14	111	5242	16
		0,40	167	4312	12	146	4208	13	105	3874	15
	Limache	>100,00	238	9904	55	233	9881	56	224	9807	58
		0,40	265	9929	67	261	9908	68	253	9842	70
2014	El Parque	>100,00	154	7558	30	148	7529	31	136	7434	33
		0,40	178	6368	29	170	6332	30	156	6217	32
	San Lorenzo	>100,00	137	6792	25	130	6759	26	117	6653	28
		0,40	172	6276	25	163	6235	26	147	6104	28
Trigo											
2013	El Parque	>100,00	244	7793	29	235	7745	30	215	7591	32
		0,20	180	6878	24	171	6833	25	154	6691	27
	Limache	>100,00	213	7904	28	204	7859	29	186	7718	31
		0,27	156	5392	11	132	5273	12	84	4892	14
2014	El Parque	>100,00	243	5419	17	225	5326	18	187	5028	20
		0,40	127	3715	10	107	3615	11	67	3294	13
	San Lorenzo	>100,00	229	7129	17	212	7040	18	176	6757	20
		0,40	172	4451	15	156	4371	16	124	4116	18

Dosis óptima económica e índice de suficiencia de nitrógeno

En cebada y en trigo las diferencias de disponibilidad de nitrógeno en relación a los niveles de dosis óptima económica explicaron las variaciones del índice de suficiencia de nitrógeno. Los modelos fueron significativos en suelos profundos y someros. En la figura 1 se muestra la relación entre el índice de suficiencia de nitrógeno de cebada y de trigo y la diferencia de nitrógeno a la dosis óptima económica para diferentes relaciones de precio de nitrógeno y de grano. Los parámetros de los modelos se muestran en la tabla 5. La diferencia con la dosis óptima económica explicó entre 56 y 65% de las variaciones de índice de suficiencia de nitrógeno en cebada según suelos fueron profundos o someros y según diferentes relaciones de precios de insumos y de productos. En trigo, la diferencia con la dosis óptima económica explicó entre 57 y 80% de las variaciones de índice de suficiencia de nitrógeno según suelos fueron profundos o someros y relaciones de precio estudiadas. En general se observaron mejores ajustes en trigo y en los suelos profundos. Además, en condiciones de relaciones de precio de insumos y de productos más bajas se observó mejor ajuste los modelos propuestos.

La dosis óptima económica de nitrógeno presentó rango de valores de ISN de 0,95 a 0,97 en cebada. Las diferencias de los valores de ISN se asociaron a modificaciones en rango de relación de precios, con relaciones de precio menores se observó ISN mayores. Mientras que en trigo el rango observado de ISN para condiciones de dosis óptima de nitrógeno fue de 0,89 a 0,99. Tanto la profundidad de los suelos como la relación de precios mostraron efectos sobre ISN. Los sitios de suelos profundos alcanzaron los niveles de dosis óptima económica con mayores niveles de ISN que las zonas de suelos

someros. Los valores observados fueron similares a los observados en cebada mostrando diferencias según la relación de precios. En los sitios de trigo de suelos someros se observaron menores valores de ISN (tabla 5).

Tabla 5: Resumen de relación entre variaciones de dosis óptima económica de nitrógeno (dDOEN) e índice de suficiencia de nitrógeno (ISN): ecuación ajustada, valores de ISN para niveles óptimo de dosis económica de nitrógeno, ajuste de regresión R² y significancia según valor de p para diferentes relaciones de insumo producto y profundidad de los suelos. I:P= Relación insumo producto.

Relación I:P	Profundidad de suelos	Modelo de regresión	ISN cuando dDOEN=0	adj R ²	p
Cebada					
I:P = 4	Profundo	$-2E-06x^2 + 0,0006x + 0,9$	0,9722	0,6533	<0,001
	Somero	$-3E-06x^2 + 0,0005x + 0,9$	0,9784	0,637	<0,001
I:P = 6	Profundo	$-2E-06x^2 + 0,0006x + 0,9$	0,965	0,6389	<0,001
	Somero	$-2E-06x^2 + 0,0006x + 0,9$	0,9717	0,6149	<0,001
I:P = 10	Profundo	$-1E-06x^2 + 0,0007x + 0,9$	0,9505	0,5963	<0,001
	Somero	$-2E-06x^2 + 0,0006x + 0,9$	0,959	0,5625	<0,001
Trigo					
I:P = 4	Profundo	$-6E-06x^2 + 0,0001x + 0,9$	0,9966	0,8063	<0,001
	Somero	$-4E-06x^2 + 0,0009x + 0,9$	0,9553	0,6599	<0,001
I:P = 6	Profundo	$-6E-06x^2 + 0,0003x + 0,9$	0,9925	0,78	<0,001
	Somero	$-3E-06x^2 + 0,001x + 0,9$	0,9354	0,6378	<0,001
I:P = 10	Profundo	$-5E-06x^2 + 0,0007x + 0,9$	0,9719	0,7049	<0,001
	Somero	$-2E-06x^2 + 0,0011x + 0,8$	0,8943	0,5775	<0,001

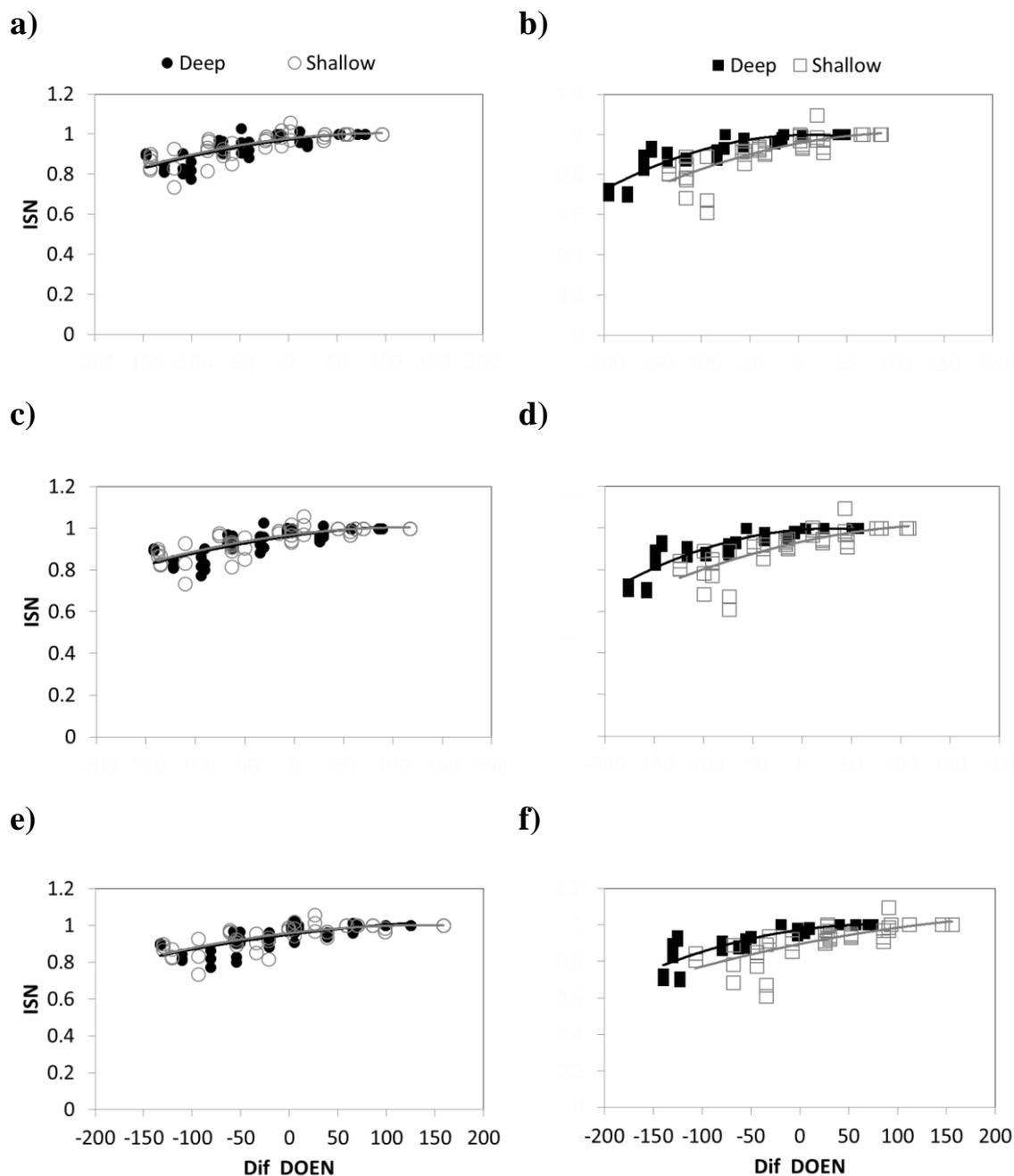


Figura 1: Relación entre el índice de suficiencia de nitrógeno (ISN) de cebada (a, c, e) y trigo (b, d, f) y la diferencia de nitrógeno a la dosis óptima económica (Dif DOEN) en kg N ha⁻¹ para diferente relación de precio de nitrógeno y de grano: 10 (a y b), 6 (c y d) y 4 (e y f). Símbolos llenos corresponden a suelos profundos y símbolos vacíos corresponden a suelos someros. Valores de dif DOEN negativos y positivos indican deficiencias y excesos de nitrógeno, respectivamente.

Discusión

Las diferencias de rendimientos entre suelos someros y profundos en trigo son coincidentes con las

observadas por Sadras y Calviño (2001) en la misma región de estudio en suelos Argiudoles Típicos y Argiudoles Petrocalcicos. Estos autores mostraron asociación entre la profundidad de los suelos y los rendimientos relativos de trigo soja maíz y girasol, con manejo ajustado de nitrógeno según prácticas adecuadas para la región. Los resultados observados en este trabajo mostraron diferencias de rendimientos menores entre suelos someros y profundos en condiciones de bajos niveles de nitrógeno disponible y diferencias mayores a las observadas por Sadras y Calviño (2001) con niveles de nitrógeno disponible altos. En trigo, la mayor disponibilidad de nitrógeno incremento las diferencias de los rendimientos entre los suelos profundos y someros (Figura 2). En cebada las brechas de rendimientos entre suelos someros y profundos no han sido reportadas en condiciones similares a la región de estudio. Sin embargo, Calviño y Sadras (2002) han descripto la evapotranspiración potencial y las precipitaciones frecuentes en la región. Describieron condiciones de precipitaciones promedio de junio a septiembre mayores a evapotranspiración potencial, mientras que precipitaciones promedio de octubre a diciembre menores a evapotranspiración potencial. Al evaluar los efectos sobre la producción de trigo resaltan la necesidad de adecuar mayor parte de desarrollo de cultivo en condiciones de adecuados balances hídricos. Siendo esta estrategia principalmente necesaria en suelos someros. El cultivo de cebada en la región de estudio tiene etapas de desarrollo de menor duración en relación al trigo, abarcando mayor parte de su ciclo en condiciones de mejores balances hídricos descriptos por Calviño y Sadras (2002). Las mejores condiciones de balances hídricos en cebada podrían explicar las menores brechas de producción entre los suelos someros y profundos.

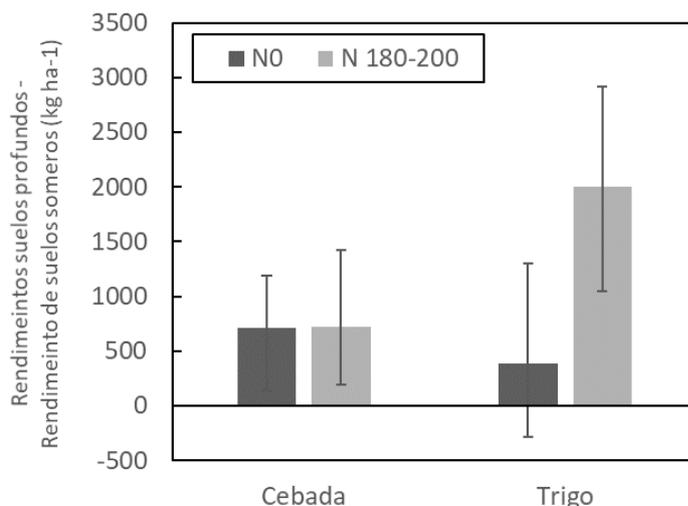


Figura 2: Diferencia de rendimientos entre suelos profundos y suelos someros según cultivo y nivel de fertilización con nitrógeno.
NO = Promedio de rendimientos de tratamientos sin fertilización con nitrógeno. N 180-200 = Promedio de rendimientos de tratamientos con fertilización máxima con nitrógeno de 180 o 200 kg N ha⁻¹ según sitio. Barras de error corresponde a valores mínimos y máximos observados según nivel de fertilización con nitrógeno y cultivo.

Los niveles de DOEN observados en este trabajo mostraron diferencias entre sitios, cultivos y la profundidad de los suelos. Para Argiudoles típicos han sido reportado la disponibilidad de N como nitratos en pre siembra para caracterizar sitios deficientes y ajustar disponibilidad de nitrógeno. En la región de estudio con suelos Argiudoles Típicos y Argiudoles petrocalcicos para condiciones de rendimientos de 3500 a 4000 kg/ha los niveles umbrales reportados fueron 125 kg N ha⁻¹ (Gonzales Montaner et al., 1991), mientras que para rendimientos superiores a 5000 kg/ha se actualizaron a 175 kg N ha⁻¹ (Echeverría et al. 2001; Gonzalez Montaner et al., 2003). Las DOEN no han sido reportadas en la región de estudio. Los resultados observados muestran asociación con lo reportado por Gonzales Montaner et al. (1991), Echeverría et al. (2001) y Gonzalez Montaner et al. (2003). Para rendimientos mayores a 5000 kg ha⁻¹ y relaciones de I:P= 6 el rango de DOEN fue de 130 a 261 kg N ha⁻¹ en cebada y 132 a 235 kg N ha⁻¹ en trigo. Mientras que para rendimientos menores a 5000 kg ha⁻¹ el DOEN fue

de 147 kg N ha⁻¹ en cebada (1 sitio con suelos somero) y 107 a 156 kg N ha⁻¹ en trigo. Las principales diferencias entre DOEN se observaron entre sitios y campañas. En cebada no se observan diferencias de DOEN según profundidad de los suelos. Mientras que, en trigo, los suelos de mayores profundidades alcanzaron rendimientos mayores y los niveles de nitrógeno para DOEN fueron 30% mayores que los suelos someros. Al analizar la eficiencia de uso de nitrógeno también las principales diferencias se dan entre sitios y campañas tanto en cebada como en trigo. Por ejemplo, en cebada la eficiencia de uso de nitrógeno fue de 13 y 14 kg grano kg nitrógeno en sitio el parque campaña 2013 y de 56 y 68 kg grano kg nitrógeno en sitio Limache campaña 2013 (I:P = 6).

Los valores umbrales de ISN fueron levemente inferiores a los observados por Reussi Calvo et al. (2020) en cebada. Estos autores bajo condiciones de suelos Argiudoles Típicos en evaluaciones en primer nudo visible ajustaron valores de 0,98 de ISN. El rango de resultados observado en este trabajo fue de 0,97 a 0,96 para similar relación de I:P. Estos valores no mostraron diferencias según tipos de suelos, pero mostraron efectos de relaciones de I:P que han sido reportados en maíz por Saiz Rozas et al. (2019) sobre suelos Argiudoles Típicos.

En trigo los valores ISN fueron diferentes a los reportados por Reussi Calvo et al. (2020). Estos autores observaron ISN de 0,95 bajo condiciones de suelos profundos (Argiudoles Típicos) y relaciones de precio I:P de 5,9. En este trabajo, en condiciones de suelos profundos e I:P de 6 y el ISN fue de 0,99 y en suelos someros fue de 0,93. Los rangos de rendimientos son levemente inferiores a los explorados por Reussi calvo et al. y los sitios tuvieron menores niveles de nitrógeno inicial, menores niveles de nitrógeno anaeróbico y mayor cantidad de años de agricultura continua (datos no presentados). Estas diferencias entre los experimentos podrían explicar las diferencias observadas. En coincidencia con cebada, las relaciones de I:P en trigo mostraron efectos sobre los valores de ISN.

Para las condiciones evaluadas los niveles de ISN mostraron diferencias según cultivo, profundidad de los suelos y relaciones de precio. Estos resultados no son coincidentes con Reussi Calvo et al. (2020) que han propuesto para condiciones de suelos Argiudoles Típicos uso de único valor de ISN para cebada y trigo. En las condiciones evaluadas los ISN son diferentes dependiendo del cultivo y los tipos de suelos. Además, es necesario considerar la relación I:P para ajustar los umbrales según la coyuntura de precios.

Se destaca la necesidad de ajustar el uso de ISN como herramienta para seguimiento de estado nutricional de los cultivos. Los resultados muestran diferencias en la DOEN según campaña y sitio y requieren de herramientas que permitan ajustar decisiones de manejo durante el ciclo de los cultivos.

Conclusiones

El índice de suficiencia de nitrógeno permite ajustar el estado de nutrición nitrogenada en trigo y en cebada durante su ciclo de crecimiento. Su utilización requiere considerar las propiedades de cultivo como la producción y el uso de nitrógeno según trigo y de cebada, condiciones de sitio como la profundidad de los suelos y aspectos económicos como la relación de precios de insumos y de productos. El adecuado ajuste de la nutrición con nitrógeno permite incrementar la eficiencia de uso del nutriente y limitar los efectos negativos sobre la economía y sobre el ambiente de los excesos y las deficiencias de la fertilización con nitrógeno en trigo y en cebada.

Referencias

Barbieri, P. A., Echeverría, H. E., y Saínz Rozas, H. R. (2012). Alternatives for nitrogen diagnosis for wheat with different yield potentials in the humid pampas of Argentina. Communications in soil science and plant analysis, 43(11), 1512-1522. DOI: 10.1080/00103624.2012.675388

- Barker, D.W., y J.E. Sawyer. 2010. Using active canopy sensors to quantify corn nitrogen stress and nitrogen application rate. *Agron. J.* 102:964-971.
- Bell, M. J., Strong, W., Elliott, D., y Walker, C. (2013). Soil nitrogen—crop response calibration relationships and criteria for winter cereal crops grown in Australia. *Crop and Pasture Science*, 64(5), 442-460. DOI: 10.1071/CP12431
- Calviño, P., y V.O. Sadras. 2002. On-farm assessment of constraints to wheat yield in the southeastern Pampas. *Field Crops Res.* 74: 1-11.
- Clay, D.E., T.P. Kharel, C. Reese, D. Beck, G. Carlson, S.A. Clay, y G. Reicks. 2012. Winter wheat crop reflectance and nitrogen sufficiency index values are influenced by nitrogen and water stress. *Agron. J.* 104:1612-1617.
- Crews, T. E., y Peoples, M. B. (2005). Can the synchrony of nitrogen supply and crop demand be improved in legume and fertilizer-based agroecosystems? A review. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 72(2), 101-120. DOI: 10.1007/s10705-004-6480-1
- De Oliveira Silva, A., Ciampitti, I. A., Slafer, G. A., y Lollato, R. P. (2020). Nitrogen utilization efficiency in wheat: A global perspective. *European Journal of Agronomy*, 114, 126008. DOI: 10.1016/j.eja.2020.126008
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., y Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32, 1-6. DOI: 10.1007/s11676-020-01155-1
- Kuznetsova, A., y Khokhlova, O. (2015). Dynamics and genesis of calcic accumulations in soils and sediments of the Argentinean Pampa. *International Journal of Sediment Research*, 30(3), 179-189. DOI: 10.1016/j.ijsrc.2014.11.002
- Ladha, J.K., H. Pathak, T.J. Krupnik, J. Six, y C. van Kessel. 2005. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and prospects. *Adv. Agron.* 87:85-156.
- Malhi, S. S., Johnston, A. M., Schoenau, J. J., Wang, Z. L., y Vera, C. L. (2006). Seasonal biomass accumulation and nutrient uptake of wheat, barley and oat on a Black Chernozem soil in Saskatchewan. *Canadian Journal of Plant Science*, 86(4), 1005-1014. DOI: 10.4141/P05-116
- Meisinger, J. J., y Delgado, J. A. (2002). Principles for managing nitrogen leaching. *Journal of soil and water conservation*, 57(6), 485-498.
- Myers, R. J. K. (1984). A simple model for estimating the nitrogen fertilizer requirement of a cereal crop. *Fertilizer Research*, 5(1), 95-108. DOI: 10.1007/BF01049494
- Pazos M. y Silvia A. Mestelan. 2002. Variability of Depth to Tosca in Udolls and Soil Classification, Buenos Aires Province, Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1256–1264 (2002).
- Reussi Calvo NI, Sainz Roza HE, Echeverría H, y Diovisalvi N (2015) Using canopy indices to quantify the economic optimum nitrogen rate in spring wheat. *Agron J* 107:459–465.
- Reussi Calvo, N. I., Sainz Rozas, H., Echeverría, H., y Berardo, A. (2013). Contribution of anaerobically incubated nitrogen to the diagnosis of nitrogen status in spring wheat. *Agronomy Journal*, 105(2), 321-328. DOI: 10.2134/agronj2012.0287
- Reussi Calvo, N. I., Wyngaard, N., Orcellet, J., Sainz Rozas, H. R., y Echeverría, H. E. (2018). Predicting field-apparent nitrogen mineralization from anaerobically incubated nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 82(2), 502-508. DOI: 10.2136/sssaj2017.11.0395
- Reussi Calvo, N. I., Wyngaard, N., Queirolo, I., Prystupa, P., y Rozas, H. R. S. (2020). Canopy Indices: a Model to Estimate the Nitrogen Rate for Barley and Wheat. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(4), 2419-2430. DOI:
- Sadras, V., y Calderini, D. (Eds.). (2020). *Crop Physiology Case Histories for Major Crops*. Academic Press.
- Samborski, S. M., Tremblay, N., y Fallon, E. (2009). Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations. *Agronomy journal*, 101(4), 800-816. DOI: 10.2134/agronj2008.0162Rx
- Scharf PC, Brouder SM, y HoefRG (2006) Chlorophyll meter readings can predict nitrogen need and yield response of corn in the North- Central USA. *Agron J* 98:655–665.
- Schepers J, Blackmer T, Francis D (1992) Predicting N fertilizer needs for corn in humid regions: using chlorophyll meters. In: Bock B, Kelly K (eds) *Predicting fertilizer needs for corn in humid regions*. NFERC, Bull. Y-226, Muscle Shoals, pp 105–114.
- Spaner, D., Todd, A.G., Navabi, A., McKenzie, D.B. y Goonewardene, L.A. (2005), Can Leaf Chlorophyll Measures at Differing Growth Stages be used as an Indicator of Winter Wheat and Spring Barley Nitrogen Requirements in Eastern Canada?. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 191: 393-399. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2005.00175.x>
- Taylor, A. C., Storrier, R. R., y Gilmour, A. R. (1974). Nitrogen needs of wheat. 1. Grain yield in relation to soil nitrogen and other

factors. Australian Journal of Experimental Agriculture, 14(67), 241-248. DOI: 10.1071/EA9740241

Yin, M., Li, Y., Xu, L., Shen, S., y Fang, H. (2018). Nutrition diagnosis for nitrogen in winter wheat based on critical nitrogen dilution curves. Crop Science, 58(1), 416-425. DOI: 10.2135/cropsci2017.05.0326

Zhao, B. (2014). Determining of a critical dilution curve for plant nitrogen concentration in winter barley. Field Crops Research, 160, 64-72. DOI: 10.1016/j.fcr.2014.02.016

Ziadi N, Brassard M, Belanger G, Claessens A, Tremblay N, Cambouris AN, Nolin MC, y Parent LE (2008) Chlorophyll measurements and nitrogen nutrition index for the evaluation of corn nitrogen status. Agron J 100:1264–1273.