

DIAGNÓSTICO DE FERTILIDAD NITROGENADA EN EL SUDOESTE BONAERENSE MEDIANTE EL USO DE UN CLOROFILÓMETRO EN TRIGO

JUAN MANUEL MARTÍNEZ^{1-3*}; JUAN ALBERTO GALANTINI² & MARÍA ROSA LANDRISCINI¹

Recibido: 17-08-14

Recibido con revisiones: 19-02-15

Aceptado: 19-02-15

RESUMEN

El medidor de clorofila es una herramienta promisorio para monitorear el nivel de nitrógeno (N) a través del índice de verdor (IV). La hipótesis fue que las estimaciones obtenidas a partir del uso del clorofilómetro van a estar más vinculadas al N cosechado en la materia seca del trigo (*Triticum aestivum* L.) que al rendimiento en grano ya que este se verá afectado por la variación climática. El objetivo fue i) determinar la sensibilidad del IV para predecir la materia seca (MST) y grano, contenido proteico y acumulación de N en el cultivo y ii) evaluar la disponibilidad de N al momento de la siembra para establecer parcelas de referencia con suficiencia de N, mediante el uso de un clorofilómetro en diferentes estadios del cultivo del trigo, comparando ensayos a campo con otro en macetas con el agua controlada. En 2010 se realizó un ensayo de fertilización con N en macetas, mientras en 2011 y 2012 se realizaron ensayos a campo en dos sitios del Sudoeste bonaerense (SOB). En dos (Z22 y Z40) y tres estadios (Z22, Z40 y Z70) del cultivo de trigo se tomaron lecturas con clorofilómetro para los ensayos a campo y en macetas, respectivamente. Para la predicción a campo, se establecieron regresiones significativas de todos los parámetros con las lecturas de clorofilómetro con ajustes bajos ($R^2=0,11-0,29$). En macetas, la predicción del N absorbido con lecturas en los tres estadios aumentaron, sin diferencias entre las pendientes y obteniendo un ajuste elevado ($R^2=0,79$). El clorofilómetro sería un indicador promisorio del N absorbido, sin embargo, en estas regiones no sería una herramienta certera para predecir el rendimiento ni el contenido de proteína en trigo (variedad ACA 303) a nivel de campo. Igualmente sería útil para estimar el N disponible necesario y también para conocer el estado nutricional de la planta.

Palabras clave. Índice de verdor; ACA 303; Región sub-húmeda.

ASSESSING NITROGEN REQUIREMENTS OF WHEAT CROPS WITH A CHLOROPHYLL METER IN THE SOUTH WESTERN PAMPAS

ABSTRACT

The chlorophyll meter is a promising tool for monitoring the N status through the green index (IV). The hypothesis is that estimates from the use of a chlorophyll meter is more closely linked to the N harvested from dry matter than to wheat (*Triticum aestivum* L.) grain yield, which is affected by climate variability. The objectives of this study were to i) determine IV sensitivity to predict total dry matter (MST) and grain yield, protein content and N-uptake, and ii) evaluate N-availability at planting in order to establish reference plots for using a chlorophyll meter during different stages of wheat. In 2010, a nitrogen fertilization trial was conducted in pots, while in 2011 and 2012, the trials were conducted on two sites in the Southwest of the Pampas (SOB) under no-tillage. In two (Z22 y Z40) and three (Z22, Z40 y Z70) stages of the crop, chlorophyll meter readings were taken for the field and pot trials, respectively. The field prediction of MST and grain yield, protein content and N uptake with chlorophyll meter readings showed significant regressions with low goodness of fit ($R^2 = 0.11$ to 0.29). In the pot experiment, the prediction of N-uptake for the three sampled stages increased, without differences in slopes and with a high goodness of fit ($R^2=0.79$). The chlorophyll meter would be a promising indicator of N-uptake by the crop; in sub-humid regions, however, it would not be an accurate tool to predict grain yield or protein content in wheat crops. Also, a chlorophyll meter would be useful to estimate the available N needed by the wheat crop and to determine the nutritional status of the plant.

Key words. Green index; ACA 303; Sub-humid Region.

¹ Cerzos, Conicet-Universidad Nacional del Sur

² Comisión de Investigaciones Científicas (CIC)

³ Departamento de Agronomía, UNS.

* Autor de contacto: juanmar.85@gmail.com

INTRODUCCIÓN

El cultivo de trigo es la base de los sistemas productivos en un amplio sector del Sudoeste bonaerense (SOB). Sus rendimientos están influenciados por las condiciones climáticas y las propiedades edáficas, requiriendo un uso eficiente del agua y del nitrógeno (Martínez *et al.*, 2012). En las regiones semi-áridas y sub-húmedas, la optimización en la aplicación de fertilizantes es difícil, debido a la errática disponibilidad de agua de las precipitaciones (Galantini *et al.*, 2000). Además de dicha variación y escasez, gran parte de las precipitaciones tiene lugar durante el período de barbecho, razón por la cual su mayor parte no es utilizada por los cultivos limitando el rendimiento y la respuesta a la fertilización (Quiroga *et al.*, 2005). En la actualidad la metodología más difundida de diagnóstico de N para el cultivo de trigo, se basa en la medición del contenido de nitratos en suelos (0-60 cm), práctica que trae consigo los inconvenientes de los costos de los análisis que pueden ser elevados y el tiempo operativo desde la toma de la muestra hasta la obtención del dato analítico. Es por eso que se están buscando herramientas de diagnóstico que permitan disminuir costos y aumentar la eficiencia del uso del N. El medidor de clorofila (por ejemplo el Spad®) es una herramienta promisoría para monitorear el estado nitrogenado a través del IV del cultivo, que es expresado en unidades de lectura (unidades Spad, US). Específicamente, permite medir la concentración relativa de clorofila por medio de la luz transmitida a través de la hoja en 650 nm, que es la longitud de onda fotosintéticamente activa y en 940 nm. La diferencia de transmitancia entre estas dos longitudes de onda resulta en el IV que puede ser asociado con el contenido de clorofila extraíble (Waskom *et al.*, 1996). La intensidad de color verde se relaciona con la concentración de clorofila y el N en la hoja (Wood *et al.*, 1993), dado que los cloroplastos contienen aproximadamente el 70% del N de la hoja (Madakadze *et al.*, 1999). Esta metodología permite caracterizar el estado nitrogenado de una manera no destructiva (Sainz Rosas & Echeverría, 1998), rápida y sencilla, permitiendo realizar muestreos frecuentes y explorar con mayor detalle la variabilidad en un sitio comparado con otros métodos conocidos (Gandrup *et al.*, 2004). Además, presenta la ventaja de permitir la corrección en el corto plazo ya que el dato se obtiene "in situ". Sin embargo, dado que el IV se ve afectado por numerosos factores como genotipos, estados de crecimiento, otros nutrientes, enfermedades o ataques de insectos, y condi-

ciones ambientales al momento de la medición, es recomendable realizar calibraciones de las lecturas teniendo en cuenta estos factores mencionados. Una de las maneras de generalizar las lecturas de IV para reducir la influencia de las variables que pueden afectar, es mediante la calibración con parcelas de referencia que presenten exceso de N (Gandrup *et al.*, 2004). Esto permite determinar el índice de suficiencia de N (ISN), que resulta del cociente entre las US de cada tratamiento con respecto, a las US del tratamiento de referencia sin limitaciones de N (Gandrup *et al.*, 2004).

Debido a la escasa información sobre el uso del clorofilómetro en el SOB, su utilización requiere de una calibración que considere el ambiente y las diferentes variedades de trigo, ya que éstos son factores importantes que inciden en los resultados obtenidos (Bavec & Bavec, 2001). Respecto del efecto de la variedad sembrada, Cox *et al.* (1985) confirmaron diferencias en términos de absorción y removilización de las partes vegetativas hacia los granos.

El uso del clorofilómetro permitirá su utilización como herramienta para el diagnóstico de deficiencias de N durante el ciclo del trigo y en el caso que fuese necesario realizar aplicaciones diferidas de N. Arregui *et al.* (2006) han demostrado variaciones del IV generadas por distintos genotipos de una misma especie en diferentes estados de crecimiento debido a distintas disponibilidades hídricas. Por lo tanto, concluyeron que no es posible establecer un valor de IV crítico único que indique suficiencia de N en todos los cultivos, sitios, años y condiciones ambientales. En consecuencia, para las condiciones planteadas en la región sub-húmeda del SOB, se hipotetizó que las estimaciones obtenidas a partir del uso del clorofilómetro van a estar más vinculadas a la cantidad de N cosechado en la materia seca del trigo que al rendimiento en grano ya que este se verá afectado por la variación climática.

El objetivo de este trabajo fue i) determinar la sensibilidad del IV para predecir el rendimiento tanto de MST como de grano del trigo, contenido proteico y acumulación de N en el cultivo y ii) evaluar la disponibilidad de N al momento de la siembra para establecer parcelas de referencia con suficiente cantidad de N. Con tal fin, se realizó la comparación de valores de IV obtenidos con clorofilómetro en dos estadios del cultivo del trigo cultivado en ensayos a campo y en macetas con riego controlado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante los años 2010, 2011 y 2012 se realizaron ensayos de fertilización de trigo con N. En 2010 se realizó un ensayo preliminar en macetas, mientras en 2011 y 2012 se realizaron ensayos a campo.

Ensayos a campo

Se ubicaron en dos sitios diferentes del SOB: Hogar Funke (2011) y La Casilda (2012), ambos ubicados en el partido de Tornquist. Los suelos, cuyas características edáficas se detallan en la Tabla 1, se clasificaron taxonómicamente como Argiudol típico (Hogar Funke) (38°10'15,6" S; 62°01'50,1" O) y Argiudol ústico (La Casilda) (38°19'25,4" S; 61°44'21,4" O). En ambos casos, los horizontes petrocálcicos (tosca), se ubican por debajo del metro de profundidad efectiva y por ello, no constituyen una limitante para el desarrollo del cultivo. El sistema de labranza fue siembra directa para ambos ensayos.

El diseño experimental fue de bloques completos aleatorizados, con tres repeticiones durante ambos años. Los tratamientos consistieron en 6 dosis de N (0, 25, 50, 100, 150 y 200 kg N ha⁻¹) aplicadas a la siembra, en forma de urea (granulado, 46-0-0) y al voleo. Las parcelas abarcaron una superficie de 36 m² (9 m de longitud y 4 m de ancho). La siembra del trigo se realizó el 22 de junio y el 15 de julio de 2011 y 2012, respectivamente. La variedad de trigo utilizada fue ACA 303 en ambos casos. Para asegurar la suficiencia de fósforo (P) en el suelo, se aplicó una dosis de 20 kg P ha⁻¹, como superfosfato triple (granulado, 0-46-0, grado equivalente) durante la siembra. Los cultivos antecesores fueron girasol (*Helianthus annuus* L) y trigo, en los años 2011 y 2012, respectivamente.

Se realizaron 20 mediciones (lecturas) por parcela con el clorofilómetro Spad Minolta 502 en el cultivo de trigo en dos estadios de crecimiento siguiendo la escala Zadoks *et al.* (1974): macollaje (Z22) y espiga embuchada (Z40). Las lecturas se

efectuaron sobre el tercio superior de la última hoja totalmente expandida, en el centro de la misma entre el margen y la nervadura central, evitando dicha nervadura como así también zonas cloróticas o dañadas si las hubiese (recomendaciones detalladas en el instructivo del equipo). Simultáneamente, en los mismos momentos de muestreo, se recolectó 1 m lineal de material vegetal para cuantificar la producción de MST y el contenido de N total (Nt) foliar (Bremner, 1996). En madurez fisiológica (Z90), se tomaron muestras de material vegetal para la determinación de MST y rendimiento en grano. Sobre el material vegetal se determinó el contenido de Nt tanto en grano como en la paja (Bremner, 1996). La proteína se determinó multiplicando al Nt del grano por el factor 5,75 (Novoa & Loomis, 1981). De ahora en adelante a MST, grano, proteína y N absorbido a madurez fisiológica se los denominará "parámetros evaluados".

Debido a que en ambos sitios, las propiedades edáficas fueron similares y no se evidenciaron diferencias en las fracciones granulométricas (Tabla 1), en el estudio estadístico se tomaron los sitios como réplicas y los años como variable por la variabilidad climática que caracteriza al SOB.

Los rendimientos medios en MST y grano de los tratamientos N₀ a N₂₀₀ de cada ensayo fueron expresados como Rendimiento Relativo (RR), dividiendo su valor por el rendimiento medio alcanzado por el tratamiento N₂₀₀:

$$RR = \text{Rendimiento } N_0 \text{ a } N_{200} / \text{Rendimiento promedio } N_{200} \quad (1)$$

Los niveles críticos de las variables US e ISN fueron determinadas mediante el método gráfico de Cate & Nelson (1971) fijándose un RR crítico de 0,90.

Ensayo en macetas

El ensayo en macetas se llevó a cabo en el predio del Departamento de Agronomía de la Universidad Nacional del

Tabla 1. Características edáficas del suelo (0-20 y 0-60 cm) de los sitios seleccionados y del ensayo en macetas (0-20 cm).

Table 1. Soil properties of sites (0-20 and 0-60 cm) and pot experiment (0-20 cm).

Sitio	Año	Prof. (cm)	N disponible (kg ha ⁻¹)	MO (g kg ⁻¹)	Nt (g kg ⁻¹)	Pe (mg kg ⁻¹)	pH	Textura		
								Arena	Limo	arcilla
Depto. Agronomía Hogar Funke	2010	0-20	35,4	15	0,8	21	8,2	680	195	125
		0-60	46,6	24	1,4	14	6,6	541	284	176
La Casilda	2012	0-20		26	1,5	8	6,4	510	266	225
		0-60	106,8							

N disponible; nitrógeno inorgánico disponible (kg N-NO₃ ha⁻¹); MO, materia orgánica (g MO kg⁻¹ suelo); Nt, nitrógeno total (g N kg⁻¹ suelo); Pe, fósforo extraíble (mg Pe kg⁻¹ suelo), pH, potencial Hidrógeno.

Sur, ubicado en Bahía Blanca (38°41'48,2" S; 62°15'0,17" O) durante el año 2010. El mismo se realizó con las macetas a la intemperie (no bajo cubierta ni invernadero), de manera de reproducir las condiciones de campo de la manera más aproximada, pero sin limitaciones hídricas, ya que se realizaron riegos complementarios semanales con agua destilada. Se utilizaron un total de 225 macetas de plástico, con las siguientes medidas: altura (h)= 0,14 m, diámetro menor (d)=0,103 m, diámetro mayor (D)= 0,16 m, lo que resultó en un volumen de 1,899 L y una superficie total de la maceta de 0,020 m². El suelo utilizado fue extraído de la profundidad de 0-20 cm, obtenido del mismo sitio donde se estableció el ensayo en macetas. Los datos analíticos del suelo muestreado se detallan en la Tabla 1.

Las macetas se rellenaron con 1600 g de suelo cada una y la siembra se realizó el día 16 de julio en forma manual. Se colocaron doce semillas por maceta con el propósito de ralea una vez producida la germinación, quedando en promedio 4 plantas por maceta. La variedad de trigo utilizada fue ACA 303 al igual que en el ensayo de campo. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con 15 repeticiones. Los tratamientos evaluados fueron 0, 25, 50 y 100 kg N ha⁻¹, aplicados en forma de urea (granulado, 46-0-0), sobre la superficie de la maceta. Además se aplicó P en el suelo en el momento de la siembra a razón de 20 kg P ha⁻¹, en forma de superfosfato triple (granulado, 0-46-0, grado equivalente). Las mediciones del IV se realizaron en tres momentos diferentes: macollaje, espiga embuchada y grano acuoso (Z22, Z40 y Z70, respectivamente). En cada momento de muestreo se tomaron al azar diez lecturas con el clorofilómetro de las cuales se obtuvo un valor promedio por tratamiento. Inmediatamente a las lecturas, se realizó la cosecha de plantas en tres macetas por tratamiento en los estadios de Z22 (20%) Z41 (20%) y, el resto (60%), en grano acuoso (Z70). Dichas muestras se llevaron a estufa y se secaron a 60°C hasta alcanzar masa constante para cuantificar la materia seca (MST). Asimismo, se determinó Nt por el método kjeldahl (Bremner, 1996) y con estos datos se obtuvo el promedio de kg N m⁻². Luego se convirtieron esos datos a kg por ha⁻¹. El RR fue determinado en MST que fue el rendimiento relativo de las plantas al momento Z70 y se estimó de la misma manera que con el método a campo.

Las lecturas de clorofila tanto en el ensayo a campo como en las macetas fueron relativizadas utilizando el índice de suficiencia de nitrógeno (ISN).

$$\text{ISN} = \frac{\text{lectura de índice de verdor del tratamiento}}{\text{promedio del tratamiento con mayores dosis de N}(2)}$$

Análisis estadístico

Para el ensayo a campo se realizó ANAVA doble para diferenciar efectos de las dosis y años. La evaluación de medias se realizó por DMS de Fisher ($p < 0,05$). También se realizó ANAVA para evaluar el efecto de las dosis de N sobre las US en los diferentes estadios tanto en el ensayo a campo como en el de macetas. Se realizaron regresiones lineales simples tanto para la predicción del rendimiento de MST, grano, proteína y N absorbido mediante las US como para la determinación del N absorbido a cosecha con el ISN. Se realizó ANCOVA para verificar estadísticamente la igualdad de pendientes de las regresiones entre el ISN y el N absorbido. El análisis estadístico fue realizado con el software Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ensayos a campo

Las precipitaciones anuales totales fueron de 776 y 912 mm para 2011 y 2012, respectivamente. A pesar de las diferencias, ambos años se caracterizaron por severas sequías en los meses de primavera (Fig. 1), siendo éstas condicionantes del rendimiento según Miranda & Jorquera (1994). Además, teniendo en cuenta la necesidad teórica de agua (Nc) del trigo propuesta por Paoloni & Vázquez (1985) se observó un déficit hídrico invernal para el año 2012.

Se detectaron diferencias significativas ($p < 0,01$) para la producción de MST entre los sitios estudiados, en los momentos de macollaje (Z22) y espiga embuchada (Z40). Además en el primer muestreo se observaron efectos significativos ($p < 0,05$) de las dosis e interacción dosis x año (Tabla 2). Cuando se analizó por año, para 2011 no se hallaron efectos de la dosis ($p > 0,05$) para la producción de MST, mientras que las diferencias fueron significativas en 2012 ($p < 0,01$), obteniéndose las mayores producciones en la dosis de 100 kg N ha⁻¹. En Z40 se hallaron diferencias entre años pero ningún efecto de las dosis, siendo la MST en 2011 > 2012, con valores medios de 3561 y 2771 kg MST ha⁻¹, respectivamente.

En madurez fisiológica (Z90) no se observó interacción significativa ($p > 0,05$) entre el año y dosis sobre la MST, grano y proteína, a pesar de las diferencias en la provisión inicial de N inorgánico al momento de la siembra para ambos años. Además no se evidenció efecto del año sobre ninguno de los parámetros evaluados. Sobre la MST y la producción de grano se evidenció efecto de las dosis ($p < 0,05$) de N aplicadas (Tabla 2), al igual que con la proteína incrementándose el nivel de significación ($p < 0,001$) (Tabla 2).

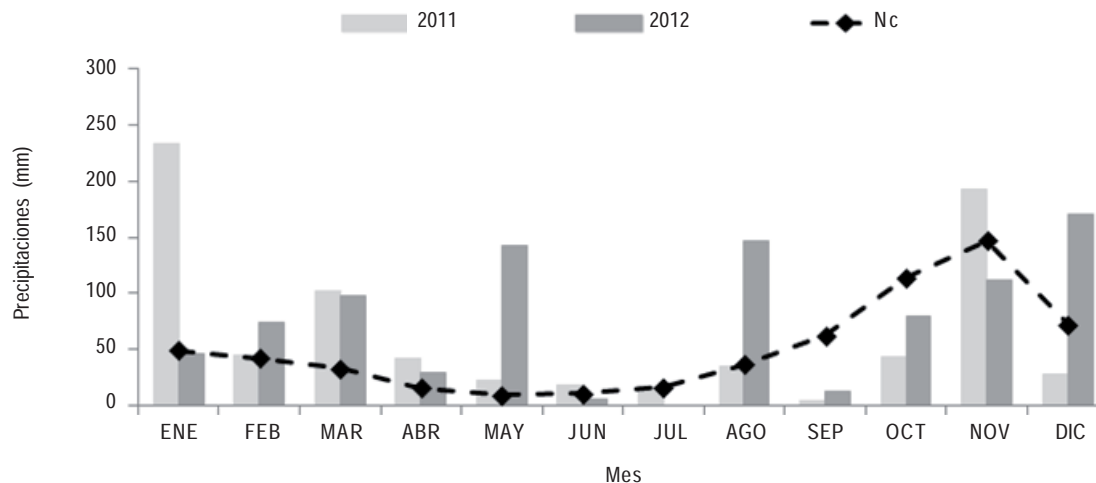


Figura 1. Precipitaciones registradas durante los años 2011 y 2012 y necesidad teórica de agua del trigo (Nc).

Figure 1. Rainfall during sampled years and crop water requirement (Nc).

Tabla 2. Materia seca total aérea del trigo en macollaje (Z22), espiga embuchada (Z40) y madurez fisiológica (Z90), rendimiento en grano y proteína según dosis de nitrógeno aplicadas para ambos años.

Table 2. Total wheat dry matter at tillering (Z22), booting (Z40) and physiological maturity (Z90) stages, grain yield and protein for both years and nitrogen application rates.

Sitio	Dosis (kg N ha ⁻¹)	Z22		Z40	Z90	
		MST		MST	grano	proteína
		(kg ha ⁻¹)				
2011	0	348	2321	3700	1032	12,3
	25	314	2423	4325	1455	14,3
	50	264	2945	4408	1367	16,0
	100	314	3117	5108	1698	15,7
	150	523	2792	4921	1657	16,6
	200	370	3033	4733	1617	15,0
2012	0	392	4216	4048	1341	14,8
	25	583	3370	4405	1697	13,7
	50	493	3498	4683	1636	14,2
	100	802	3499	4730	1535	15,9
	150	710	3639	4411	1280	16,9
	200	745	3150	4492	1474	16,0
Año (A)		***	*	ns	ns	ns
Dosis (D)		**	ns	*	*	***
DxA		*	ns	ns	ns	ns

ns: no significativo; (*): $p \leq 0,05$; (**): $p \leq 0,01$; (***): $p \leq 0,001$

En relación al N absorbido por el cultivo no se determinó interacción entre dosis por año. En los estadios Z22 y Z90, se hallaron efectos altamente significativos de la fertilización con N ($p < 0,01$) para el promedio de ambos años (Fig. 2a). En Z40 sólo se hallaron diferencias significativas ($p < 0,001$) entre años (datos no mostrados) al igual que en el estadio Z22 ($p < 0,01$), con valores promedios superiores de 94 y 60% del año 2012 con respecto a 2011 para Z22 y Z40, respectivamente. Además se observó una relación altamente significativa ($p < 0,001$) entre el N absorbido en Z90 y el N disponible con un ajuste del 58% (Fig. 2c).

Las lecturas de US presentaron diferencias en los dos estadios del trigo para ambos años, sin interacción dosis x año (Tabla 3), a pesar de las diferentes disponibilidades iniciales de N inorgánico (Tabla 1). Sólo se observaron

disminuciones de las US entre los dos momentos analizados para el tratamiento testigo, en concordancia a lo informado por Sainz Rozas & Echeverría (1998), Falótico *et al.* (1999) y Gandrup *et al.* (2004). En Z22 no se observaron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre las dosis de N aplicadas. Esto es debido a que la tasa máxima de absorción de N del trigo sucede a partir del primer nudo (Barbieri *et al.*, 2009). En cambio en Z40, se obtuvieron diferencias altamente significativas entre dosis ($p < 0,001$) respecto al tratamiento sin aplicación de N. En suelos del SOB, los valores de IV entre 46-47 US medidos en espigazón asegurarían una provisión adecuada de N, aunque determinados en otras variedades de trigo diferentes de ACA 303 (Loewy & Ron, 2008). En nuestro estudio, a excepción del tratamiento testigo todas las demás dosis indicarían una

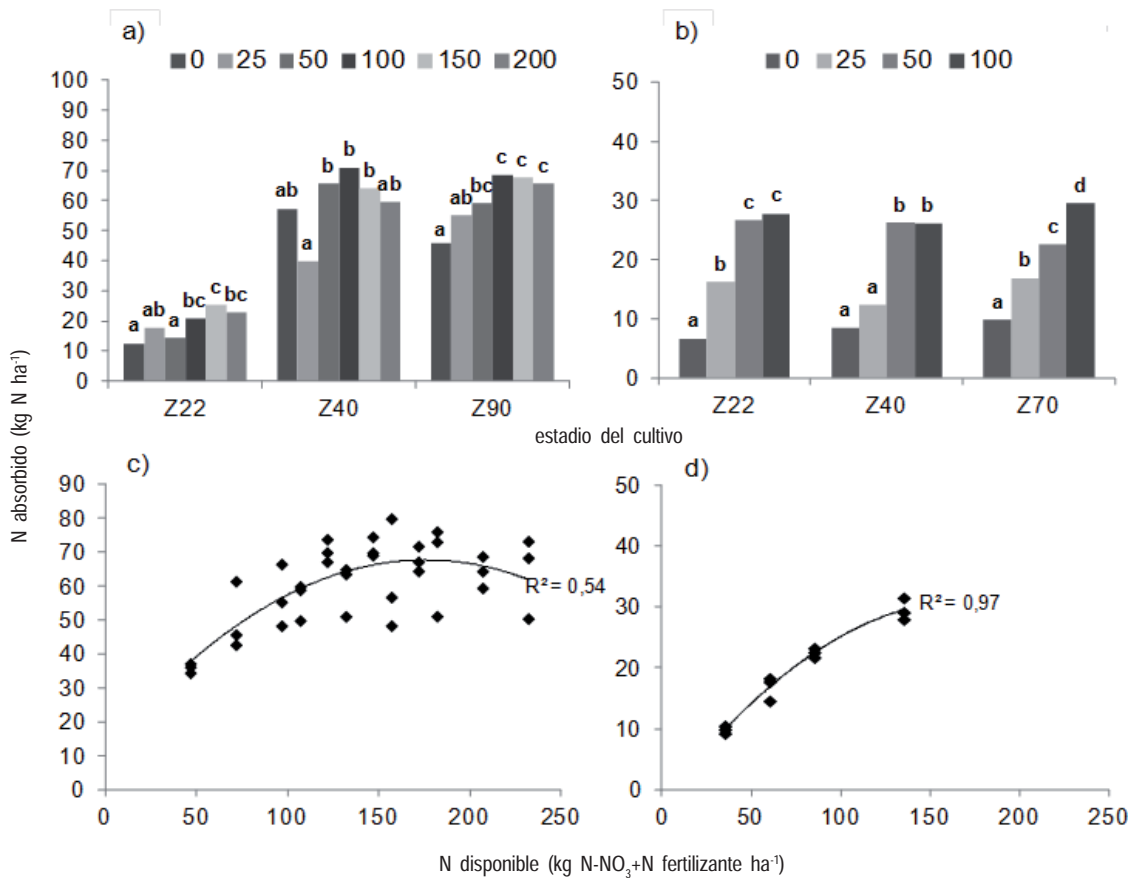


Figura 2. Cantidad de nitrógeno absorbido a) promedio de ambos años para el ensayo de campo y b) en macetas, por estadio del trigo (kg N ha^{-1}) y nivel de N disponible en el suelo c) a la siembra en la profundidad de 0-60 cm en los ensayos a campo y d) para 0-20 cm en el ensayo en macetas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis con $p < 0,05$.

Figure 2. Absolute amount of nitrogen uptake (kg N ha^{-1}) for a) average of two years from field and b) pot experiments, for each wheat growth stage; and available soil nitrogen at c) sowing in field experiment at the 0-60 cm-depth and d) in pot experiment at the 0-20 cm-depth. Different letters indicate significant differences at $p < 0,05$.

Tabla 3. Índice de verdor (US) según dosis de nitrógeno en función de los estadios de crecimiento del trigo.

Table 3. Green index (US) by nitrogen rate at different wheat development stages.

Dosis N (kg N ha ⁻¹)	Índice de verdor	
	Z22	Z40
	(US)	
0	45,7 a	42,0 a
25	45,6 a	46,5 b
50	46,2 a	47,8 bc
100	46,5 a	49,6 cd
150	46,2 a	50,1 d
200	45,2 a	51,2 d
Año (A)	ns	ns
Dosis (D)	ns	***
DxA	ns	ns

ns: no significativo; (*): $p \leq 0,05$; (**): $p \leq 0,01$; (***): $p \leq 0,001$

Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis con $p < 0,05$.

Different letters indicate significant differences at $p < 0,05$.

buena provisión de N en espiga embuchada y para ambos años. López-Bellido *et al.* (2004) hallaron estrechas relaciones ($R^2=0,90$), entre US y dosis de N en estadio de hoja bandera. Este valor sería similar ($R^2=0,92$) al hallado en nuestro estudio para los valores promedios en el estadio Z40 (datos no mostrados).

Ensayo en macetas

El rendimiento de MST en grano lechoso (Z70), estadio final del cultivo mostró efectos significativos ($p < 0,05$)

entre dosis (Tabla 4). El N absorbido demostró diferencias significativas entre las dosis en los tres estadios evaluados, siendo significativa ($p < 0,05$) para Z40 y altamente significativa ($p < 0,001$) para Z22 y Z70 (Fig. 2b). En Z70, se observó una estrecha asociación altamente significativa ($p < 0,001$) entre el N absorbido por el trigo y el N disponible a la siembra (Fig. 2d). Se determinó efecto significativo de las dosis de N sobre las US en todos los estadios. A diferencia del ensayo a campo, se detectaron valores inferiores en las US en los tres estadios analizados, con un leve incremento entre Z22 y Z40 y una disminución entre Z40 y Z70 (Tabla 4). Estos resultados estarían indicando que cuando la disponibilidad hídrica no fue limitante las US sería un buen estimador del contenido de N absorbido por el cultivo de trigo. Los valores hallados en las dosis menores a 50 kg N ha⁻¹ se encontraron por debajo del umbral informado por Loewy & Ron (2008), que trabajando en suelos del SOB y con otras variedades de trigo (*Buck Sureño, Buck Guapoy* y *Buck Farol*), informaron valores de 43-46 de US en espigazón para una correcta provisión de N. Sin embargo, estos valores coinciden con lo hallado en trabajos previos (Martínez *et al.*, 2012) para un suelo del partido de Tornquist y la variedad de trigo *Buck Poncho*, no encontrándose grandes diferencias entre las US en Z22 y Z40.

Predicción de los parámetros evaluados: comparación de ensayos a campo y en macetas

En condiciones de campo, la predicción de MST, grano, proteína y N absorbido en madurez fisiológica mediante

Tabla 4. Índice de verdor (US) de trigo en función de los estadios de crecimiento y materia seca total (MST) en Z70, según dosis de nitrógeno para el ensayo en macetas.

Table 4. Wheat green index (US) at different stages and total dry matter (MST) at Z70 by nitrogen rate and statistical analysis (ANOVA) per treatment in pots experiment.

Dosis N (kg N ha ⁻¹)	Índice de verdor			MST
	Z22	Z40	Z70	Z70
	(US)			(kg ha ⁻¹)
0	35,8 a	37,3 a	32,6 a	1318 a
25	42,3 b	37,9 a	39,4 b	1698 bc
50	43,6 bc	46,9 b	42,2 bc	1491 ab
100	45,2 c	48,0 b	45,8 c	1819 c
Dosis (D)	***	**	**	*

ns: no significativo; (*): $p \leq 0,05$; (**): $p \leq 0,01$; (***): $p \leq 0,001$

Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis con $p < 0,05$.

Different letters indicate significant differences at $p < 0,05$.

US, demostró que aunque las regresiones fueron significativas en su mayor parte ($p < 0,05$) (excepto proteína con US en Z22), los ajustes fueron bajos ($R^2 \leq 0,29$) (Tabla 5). Reeves *et al.* (1993) afirmaron, que el clorofilómetro podría ser utilizado como un buen predictor del rendimiento en grano del trigo en Z22. Sin embargo, Vidal *et al.* (1999) no lograron establecer una relación significativa entre las US y el rendimiento de trigo en Z30 coincidiendo con nuestro estudio. Denuit *et al.* (2002) y Arregui *et al.* (2006), por su parte sugirieron que los estadios más cercano a Z40 serían mejores predictores del rendimiento en grano.

En el experimento realizado en macetas se observaron regresiones significativas ($p < 0,05$) entre las US y la MST para Z22 y Z70 ($R^2 = 0,41; 0,43$), mientras que para el N absorbido las predicciones aumentaron considerablemente en los tres estadios evaluados. En los tres momentos se establecieron regresiones altamente significativas ($p < 0,001$) con valores de ajustes lineales superiores al 0,76 (Tabla 5). Los elevados R^2 obtenidos en el experimento en macetas, incluso en estadios fenológicos tempranos como en Z22, demostraría que el clorofilómetro constituiría una buena herramienta para determinar el estado nutricional del trigo y de este modo poder corregir de manera temprana eventuales deficiencias de N cuando las condiciones hídricas no son limitantes. Estas diferencias entre el experimento a campo

y el de macetas, demostraría que cuando no se realizaron riegos adicionales el factor agua resultó ser de gran importancia para estos sitios con déficit hídrico y erraticidad en las precipitaciones. Echeverría & Studdert (2001), trabajando en suelos con menores restricciones hídricas y con la variedad de trigo ProInta Oasis, demostraron que el IV medido en estadios avanzados, sería un estimador promisorio de la nutrición nitrogenada del cultivo de trigo. No obstante ello, el ajuste logrado por otros autores fue mayor al que se informa en nuestro trabajo ya que se citan valores de $R^2 = 0,89$ en la regresión entre proteína y US en Z73 (Echeverría & Studdert 2001) y $R^2 = 0,69$ y $0,62$ para la predicción en Z22 y Z40 en la variedad *Buck Poncho* en suelos del SOB (Martínez *et al.*, 2012).

Cuando se evaluó la relación entre el ISN y el N absorbido a cosecha por el trigo, se observaron importantes diferencias entre los ensayos de campo y macetas. Para el experimento a campo se encontraron relaciones significativas ($p < 0,05$) para ambos estadios, sin embargo, se observaron bajos grados de asociación (Fig. 3a) y las pendientes de las regresiones entre ISN y N absorbido para ambos estadios fueron diferentes ($p = 0,0084$). En Z22 se observó que en la mayoría de los datos, el ISN se ubicó por encima del 95% propuesto por Falótico *et al.* (1999) como nivel suficiente de N, lo que indica que en este estadio los

Tabla 5. Regresiones entre las unidades Spad (US) en diferentes estadios del trigo (Z22, Z40 y Z70) y la materia seca total, grano y contenido de proteína para el ensayo a campo y macetas.

Table 5. Linear regressions between Spad units (US) in different wheat growth stages (Z22, Z40 y Z70), in field and pots experiment.

Ensayo	Estadio trigo	Parámetro estimado							
		MST	R^2	grano	R^2	proteína	R^2	N absorbido	R^2
Campo	Z22	155,2x- 2500	0,17	60,2x- 1210	0,12	0,27x+ 2,96	0,07	2,55x- 53,8	0,11
	(p-valor)	0,0122		0,0383		0,1234		0,0479	
	Z40	83,4x+ 504,5	0,23	27,2x+ 182,6	0,11	0,21x+ 4,9	0,20	1,91x- 30,9	0,29
	(p-valor)	0,0031		0,0438		0,0062		0,0010	
Macetas	Z22	41,8x- 162,7	0,41					1,8x- 56,6	0,82
	(p-valor)	0,0254						0,0001	
	Z40	22,5x+ 624,4	0,27					1,2x- 30,6	0,76
	(p-valor)	0,0866						0,0002	
	Z70	29,3x+ 409,7	0,43					1,26x- 30,6	0,83
	(p-valor)	0,0209						<0,0001	

Ecuaciones: Parámetro estimado = $ax \pm b$, siendo $x =$ US en los diferentes estadios del cultivo.

En negrita y cursiva se observan los coeficientes de explicación (R^2) y los p-valor significativos de las regresiones lineales con $p < 0,05$.

Equations: Estimated parameter = $ax \pm b$, being $x =$ US at different crop stages.

In bold and italics were observed the explanation coefficient (R^2) and p-values of linear regressions with $p < 0,05$.

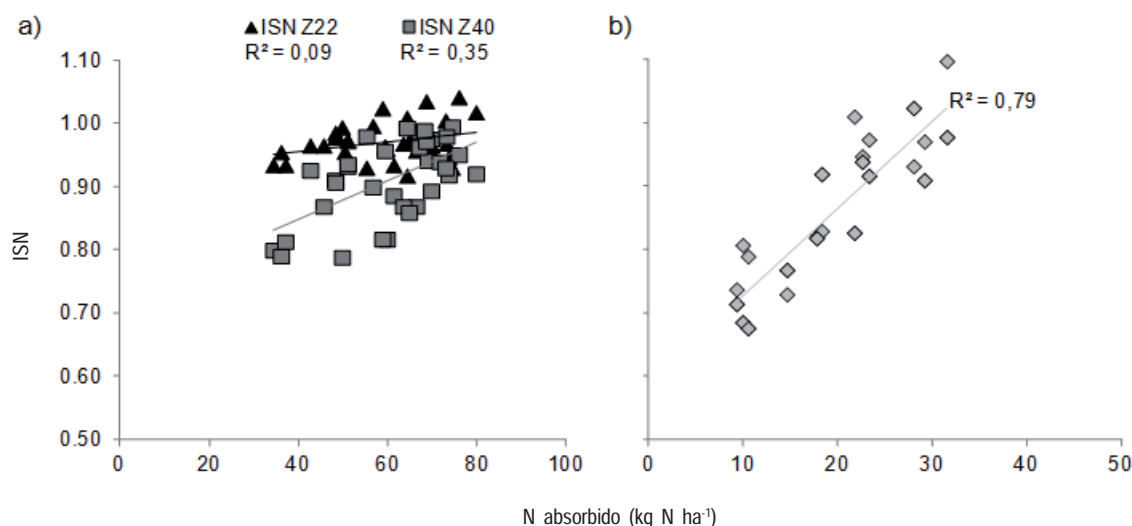


Figura 3. Relación entre el índice de suficiencia de nitrógeno (ISN) y el nitrógeno absorbido en a) ensayo a campo y b) promedio de los tres estadios en macetas.

Figure 3. Relationship between nitrogen sufficiency index and nitrogen uptake at different stages for a) the field experiment and b) the average of three stages in pots experiment.

cultivos presentaron una nutrición nitrogenada sin deficiencias. Esto podría ser debido a que durante los estadios iniciales del ciclo del cultivo las necesidades de N no son de gran magnitud y son cubiertas por la oferta de dicho nutriente desde el suelo.

En el experimento en macetas, no se hallaron diferencias en las pendientes ($p=0,3047$) en las relaciones del ISN con las US en Z22, Z40 y Z70. En promedio de los tres estadios se halló una relación lineal altamente significativa con un ajuste de $R^2=0,79$ con el N absorbido en madurez fisiológica (Fig. 3b). Esta tendencia es coincidente con lo observado con las US (Tabla 5). Gandrup *et al.* (2004) hallaron resultados similares tanto en el ISN como en las US en dos sitios del Sudeste bonaerense sin limitaciones hídricas, por lo cual el riego adicional realizado en las macetas, demostró la importancia de una adecuada provisión hídrica en la absorción y removilización del N (Papakosta & Gagjanas, 1991). Según Le Bail *et al.* (2005) la removilización del N almacenado en órganos vegetales al momento de floración, representa aproximadamente el 70% del N absorbido en grano. Este alto grado de explicación entre las variables en todos los momentos en el experimento en macetas, incluso en estadios fenológicos tempranos como en macollaje, demostró que la utilización del índice de suficiencia al igual que las US, permitieron determinar el estado nutricional del trigo en condiciones sin limitaciones hídricas. Sin embargo, en con-

diciones de campo estos resultados difirieron debido a las condiciones climáticas registradas en la región, como ya ha sido mencionado.

Sensibilidad de las unidades Spad e índice de suficiencia de nitrógeno

En el ensayo de campo, mediante la calibración de Cate & Nelson (1971) se detectaron valores críticos de 45 y 49 US por debajo del cual habría respuesta a la aplicación de N en Z22 y Z40, respectivamente. El error en la calibración fue del 28% en ambos estadios estudiados (Fig. 4a y b). Además en las relaciones lineales entre ambos parámetros se observaron bajos grados de ajuste ($R^2=0,16; 0,20$). En Balcarce, Sainz Rozas & Echeverría (1998), informaron estrechas relaciones entre el RR de maíz y las US trabajando en diferentes estadios.

En el experimento en macetas, se hallaron valores críticos inferiores a los obtenidos en el ensayo a campo y con menores errores (16 y 25%), con valores de 43,5 y 39 US para Z22 y Z40, respectivamente. Además se observaron mejores ajustes del RR de MST con las US con valores que oscilaron entre 0,41 para Z22 y 0,27 para Z40 (Fig. 4c y d). En cambio para Z70, se halló un mejor ajuste ($R^2=0,43$) y un rango crítico que osciló entre 39 y 43 US, y un error del 25%.

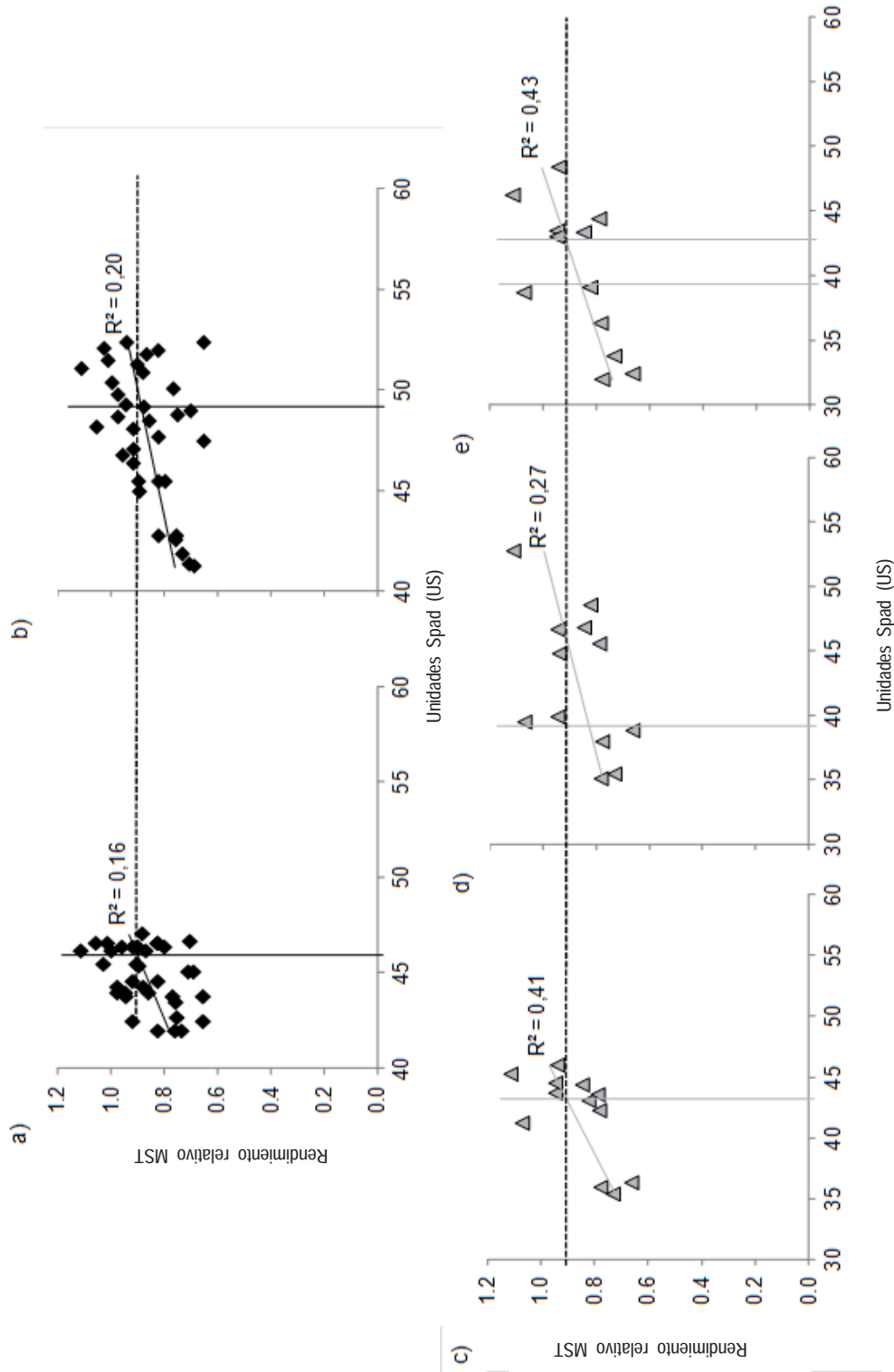


Figura 4. Relación entre los rendimientos relativos (RR) de materia seca a cosecha y el índice de verdor (US) en hoja en (a) Z22 y (b) Z40 a campo, y c) Z22, d) Z40, e) Z70 en macetas.
 Figure 4. Relationship between total dry matter relative yields (RR) and green index (US) in leaf at a) Z22, (b) Z40 for the field experiment, and c) Z22, d) Z40, e) Z70 in pot experiments.

Cuando se realizó la calibración entre ISN y N disponible a la siembra, comparando los experimentos tanto a campo como en macetas, en ambos momentos muestreados, se encontraron resultados contrastantes. Para el ensayo a campo con el ISN al 95%, en Z22 no se observaron valores críticos de N disponible por debajo del umbral. Esto se debió posiblemente a que en este cultivo la tasa máxima de absorción de N comenzó en el estadio de un nudo (Barbieri *et al.*, 2009), mientras que en Z40 se observó un valor crítico de 160 kg N disponible ha⁻¹ (Fig. 5). En cambio, en el ensayo en macetas se obtuvieron rangos críticos de N disponible que fueron semejantes en ambos estadios, oscilando entre 50 y 80 kg N ha⁻¹. Esto confirma lo descrito anteriormente sobre el estrés hídrico que sufrieron los cultivos en el campo, mientras que en las macetas esto se pudo revertir con los riegos adicionales, confirmando una mejor removilización de N en el cultivo (Fig. 2d). Se ha informado que la removilización desde los órganos vegetativos hacia los granos y su eficiencia son dependientes de las condiciones climáticas y del genotipo (Barbottin *et al.*, 2005). En síntesis, el factor de producción que más limita la producción en estos suelos es la humedad debido a las condiciones particulares del SOB, caracterizado por la variabilidad interanual de las precipitaciones tanto en la distribución como en la cantidad. Los déficits hídricos, producidos especialmente en períodos críticos del cultivo, tales como el periodo de llenado de grano,

son de gran importancia en la removilización de N al grano (Angus & Fisher, 1991).

Otros autores (Calviño *et al.*, 2002; Barbieri *et al.*, 2009) trabajando en suelos con menores restricciones hídricas, informaron valores por los cuales el cultivo de trigo no respondió a la fertilización, variando entre 100 y 150 kg N disponible ha⁻¹ para la profundidad de 0-60 cm. Estos valores se asemejaron a los encontrados en este estudio, sin embargo, fueron determinados para rendimientos muy superiores a los obtenidos localmente, por lo que esta menor eficiencia sería resultado de la escasez de agua en ciertos períodos críticos del cultivo.

CONCLUSIONES

En función de los resultados obtenidos, el medidor de clorofila sería un indicador promisorio del N absorbido, sin embargo, en el SOB debido a la variabilidad climática no sería una herramienta certera para predecir el rendimiento ni el contenido de proteína a campo con la variedad de trigo ACA 303. Igualmente sería útil para estimar el N disponible necesario para la siembra del trigo y también para conocer el estado nutricional de la planta.

Las lecturas realizadas en momentos más avanzados permitieron predecir que el N absorbido en madurez fisiológica >MST> grano, siendo menor la exactitud de la predicción a medida que el factor agua tuvo mayor influencia sobre los parámetros evaluados.

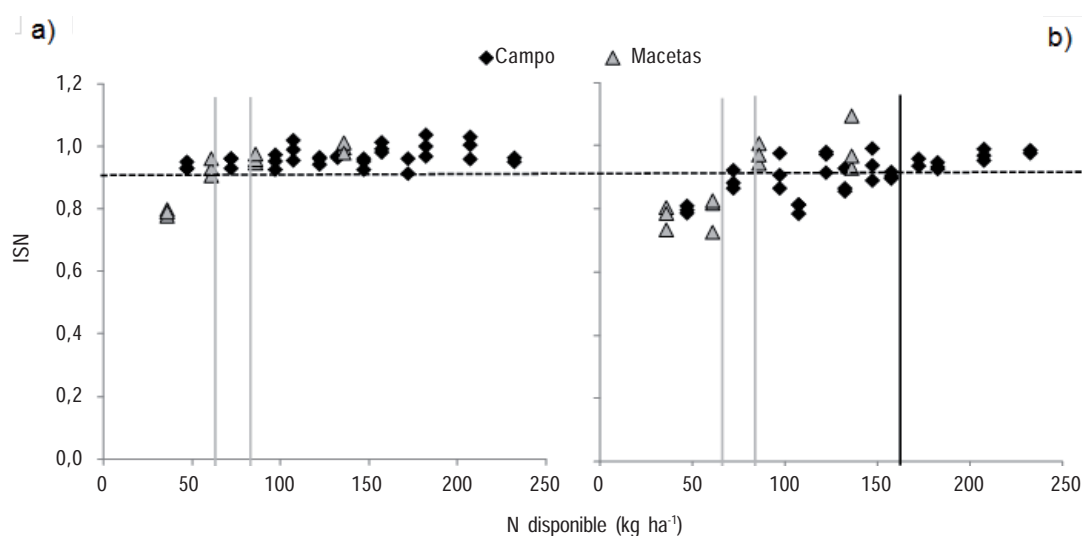


Figura 5. Relación entre el índice de suficiencia de nitrógeno y el nitrógeno disponible para a) Z22 y b) Z40 para las profundidades estudiadas en los ensayos a campo y en macetas.

Figure 5. Relationship between nitrogen sufficiency index and soil available N at a) Z22 and b) Z40 wheat growth stages for field and pot experiments at their respective depths.

Los resultados encontrados confirman las consecuencias de los déficits hídricos que generalmente ocurren en períodos críticos del cultivo en estos ambientes, ubicándolas como el principal factor de producción en estas regiones sub-húmedas. Estos resultados podrían ser útiles para otros sitios con características climáticas parecidas, donde el estrés hídrico severo impide una respuesta a la fertilización nitrogenada en la mayoría de los años.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a Profertil S.A. y a los productores de la Regional Bahía Blanca de AAPRESID, en particular a los establecimientos Hogar Funke y La Casilda donde fueron realizados los ensayos.

BIBLIOGRAFÍA

- Angus, JF & RA Fisher. 1991. Grain and protein responses to nitrogen applied to wheat growing on a red earth. *Aust. J. Agric. Res.* 42: 735-746.
- Arregui, LM; B Lasa; A Lafarga; I Irañeta; E Baroja & M Quemada. 2006. Evaluation of chlorophyll meters as tools for N fertilization in winter wheat under humid Mediterranean conditions. *Eur. J. Agron.* 24: 140-148.
- Barbieri, PA; HE Echeverría & H Sainz Rozas. 2009. Nitratos en el suelo al siembra o al macollaje como diagnóstico de la nutrición nitrogenada en trigo en el Sudeste Bonaerense. *Ci. Suelo* 27: 41-47.
- Barbottin, A; C Lecomte; C Bouchard & MH Jeuffroy. 2005. Nitrogen remobilization during grain filling in wheat: genotypic and environmental. *Crop Sci.* 45: 1141-1150.
- Bavec, F & M Bavec. 2001. Chlorophyll meter readings of winter wheat cultivars and grain yield prediction. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32: 2709-2719.
- Bremner, JM. 1996. Nitrogen total. In: *Methods of soil analysis. Part 3: Chemical Methods*; Sparks, DL. (ed). Pp. 1085-1123. SSSA. Madison WI.
- Calviño, P; HE Echeverría & M Redolatti. 2002. Diagnóstico de nitrógeno en trigo con antecesor soja bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Ci. Suelo* 20: 36-42.
- Cate, RBJ & LA Nelson. 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35: 658-660.
- Cox, MC; CO Qualset & DW Rains. 1985. Genetic variation for N assimilation and translocation in wheat. II. Nitrogen assimilation in relation to grain yield and protein. *Crop Sci.* 25: 435-440.
- Denuit, JP; M Olivier; MJ Goffaux; JL Herman; JP Goffart; JP Destain & M Frankinet. 2002. Management of nitrogen fertilization of winter wheat and potato crops using the chlorophyll meter for crop nitrogen status assessment. *Agronomie* 22: 847-853.
- Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. 2011. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Echeverría, HE & GA Studdert. 2001. Predicción del contenido de N en grano de trigo (*Triticum aestivum*) mediante el índice de verdor de la hoja bandera. *Ci. Suelo* 19: 67-74.
- Falótico, J; GA Studdert & HE Echeverría. 1999. nutrición nitrogenada del trigo bajo siembra directa y labranza convencional en condiciones de agricultura continua. *Ci. Suelo* 17: 9-20.
- Galantini, JA; MR Landriscini; JO Iglesias; AM Miglierina & RA Rosell. 2000. The effects of crop rotation and fertilization on wheat productivity in the Pampean semiarid region of Argentina: 2. Nutrient balance, yield and grain quality. *Soil Till. Res.* 53: 137-144.
- Gandrup, ME; FO García; KP Fabrizio & HE Echeverría. 2004. Evolución de un índice de verdor en hoja para evaluar el status nitrogenado en trigo. *Rev. Inv. Agrop. (RIA)* 33: 105-121.
- Le Bail, M; MH Jeuffroy; C Bouchard & A Barbottin. 2005. Is it possible to forecast the grain quality and yield of different varieties of winter wheat from Minolta SPAD meter measurements? *Eur. J. Agron.* 23: 379-391.
- Loewy, T & MM Ron. 2008. Índice de verdor en trigo según nutrición nitroazufrada
http://inta.gob.ar/documentos/indice-de-verdor-en-trigo-segun-nutricion-nitroazufrada/at_multi_download/file/3.%20nutricion_nitroazufrada_en_trigo.pdf. Revisado el 16/08/2014.
- López-Bellido, RJ; CE Shepherd & PB Barraclough. 2004. Predicting postanthesis N requirements of bread wheat with a Minolta SPAD meter. *Eur. J. Agron.* 20: 313-320.
- Madakadze, IC; KA Stewart; RM Madakadze; PR Peterson; BE Coulman & DL Smith. 1999. Field evaluation of the chlorophyll meter to predict yield and nitrogen concentration of switchgrass. *J. Plant Nutr.* 22: 1001-1100.
- Martínez, JM; MR Landriscini; JG Galantini; M Duval & CC Cerda. 2012. Predicción del rendimiento en trigo mediante la utilización del índice de verdor. XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Trabajo completo en CD-ROM. Mar del Plata, Argentina. 16 al 20 de abril de 2012.
- Miranda, R & AJ Jorquera. 1994. Rendimiento del trigo y precipitaciones. I: Campo experimental. III Congreso Nacional de trigo. 88-90. Bahía Blanca, Argentina. 18 al 22 de octubre de 1994.
- Novoa, R & RS Loomis. 1981. Nitrogen and plant production. *Plant and Soil* 58: 177-204.
- Paoloni, JD & R Vazquez. 1985. Necesidades teóricas de los cereales de invierno y probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones como base para el balance hídrico. *An. Edafol. Agrobiol.* XLIV: 1545-1556.
- Papakosta, DK & AA Gagianas. 1991. Nitrogen and dry matter accumulation, remobilization, and losses of Mediterranean wheat during grain filling. *Agron. J.* 83: 864-870.
- Quiroga, A; D Funaro; R Fernández & E Noellemeyer. 2005. Factores edáficos y de manejo que condicionan la eficiencia del barbecho en la región pampeana. *Ci. Suelo* 23(1): 79-86.
- Reeves, DW; PL Mask; CW Wood & DP Delaney. 1993. Determination of wheat nitrogen status with hand-held chlorophyll meter: influence of management practices. *J. Plant Nutr.* 16: 781-796.
- Sainz Rozas, H & HE Echeverría. 1998. Relación entre las lecturas del medidor de clorofila (Minolta SPAD 502) en distintos estadios del ciclo del cultivo del maíz y el rendimiento en grano. *Rev. Fac. Agron. La Plata* 103: 37-44.

- Vidal, I; L Longeri & JM Hétier. 1999. Nitrogen uptake and chlorophyll meter measurements in spring wheat. *Nutr. Cycl. Agroecosyst* 55: 1-6.
- Waskom, RM; DG Westfall; DE Spellman & PN Soltanpour 1996. Monitoring nitrogen status of corn with a portable chlorophyll meter. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 27: 545-560.
- Wood, CW; DW Reeves & DG Himelrick. 1993. Relationships between chlorophyll meter readings and leaf chlorophyll concentration, N status, and crop yield: a review. *Proc. Agron. Soc. of New Zealand* 23: 1-9.
- Zadoks, JC; TT Chang & CF Konzak. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.* 14: 415-421.

