

Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires  
Escuela para Graduados “Alberto Soriano”

## **ESPECIALIZACIÓN EN CULTIVOS DE GRANO**

### **FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN CULTIVOS DE INVIERNO EN BASE A NITRÓGENO DISPONIBLE EN SUELO Y CONDICIONES CLIMÁTICAS PRE-SIEMBRA (TEMPERATURA Y PRECIPITACIONES)**

**Trabajo de Coronamiento**

Ing. Agrónoma Mónica Urrutia

Universidad de la República – Facultad de Agronomía  
Montevideo – Uruguay

## **AUTOR**

*Mónica Urrutía*

Ingeniera Agrónoma

Universidad de la República – Facultad de Agronomía (Uruguay)

## **TUTOR**

*Oswaldo Ernst*

Ingeniero Agrónomo

Universidad de la República – Facultad de Agronomía (Uruguay)

Especialista en Siembra Directa

Universidad de Buenos Aires – Facultad de Agronomía

Escuela para Graduados “Alberto Soriano”.

## DEDICATORIA

En memoria de Carlos Boutes, que en mis inicios fue un gran respaldo.

A mis hijos Franco y Chiara.

## AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis Oswaldo Ernst por su dirección y apoyo al trabajo realizado.

A Zully Toledo por su colaboración en las citas de bibliográficas.

A Alexis Alonso por su ayuda durante mi trabajo de tesis.

## DECLARACIÓN

*“Declaro que el material incluido en éste no lo he presentado en forma parcial o total en ésta u otra institución”.*

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "M. G. ...". The signature is written in a cursive style with a large loop at the top.

## INDICE GENERAL

RESUMEN .....	1
ABSTRACT.....	2
1. INTRODUCCIÒN .....	3
2. REVISIÒN BIBLIOGRÀFICA.....	5
3. OBJETIVOS.....	15
4. HIPÒTESIS.....	16
5. MATERIALES Y MÈTODOS.....	17
5.1. Procesamiento y análisis de la información.....	18
6. RESULTADOS Y DISCUSIÒN.....	20
6.1. Condiciones climáticas durante el período mayo-agosto de cada año y su relación con fecha de siembra.....	20
6.2. Proporción de siembra de los cultivos de invierno sobre diferentes antecesores.....	22
6.3. Ajuste entre las dosis recomendadas de fertilización nitrogenada a la siembra y macollaje en función de la disponibilidad de $N-NO_3^-$ en el suelo y las cantidades reales aplicadas.....	23
6.4. Relación entre condiciones climáticas y disponibilidad de $N-NO_3^-$ en el suelo.....	28
6.5. Fertilización en Z3.0.....	36
7. CONCLUSIONES .....	41
8. BIBLIOGRAFÍA.....	42

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Precipitación promedio 10, 20, 30, 40 días antes de la siembra de cada chacra encuestada y temperatura media acumulada en los 10 días antes de la siembra para los años 1999-2001.	21
<b>Cuadro 2.</b> Proporción de cultivos antecesores a la siembra de los cultivos de invierno para los distintos años considerados y respuesta esperada a la aplicación de N.	22
<b>Cuadro 3.</b> Componentes principales definidos para las condiciones climáticas pre-siembra, proporción de la variación explicada y sus coeficientes.	28
<b>Cuadro 4.</b> Precipitaciones acumuladas 40 días pre-siembra y sumatoria de temperatura media diaria 10 días pre-siembra para cuatro rangos de concentración de $\text{N-NO}_3^-$ .	30
<b>Cuadro 5.</b> Porcentaje de acierto y error en la estimación de rendimiento en el estadio Z 3.0 y rendimiento real obtenido.	37

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Frecuencia acumulada de chacras sembradas a partir del 1º de mayo en el período 1999-2002 en 164 situaciones encuestadas.	20
<b>Figura 2.</b> N agregado a la siembra ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) (a) y en Z 2.2 (b) en función del $\text{N-NO}_3^-$ (ppm) en los primeros 20 cm del suelo.	23
<b>Figura 3.</b> N agregado a la siembra ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) en función del $\text{N-NO}_3^-$ (ppm) en los primeros 20 cm del suelo para chacras de alta (A) y baja (B) respuesta esperada a la fertilización.	24
<b>Figura 4.</b> Relación entre N recomendado y N aplicado para cada chacra a la siembra ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).	25
<b>Figura 5.</b> Relación entre N recomendado y N aplicado para cada chacra en Z 2.2 ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).	25
<b>Figura 6.</b> N disponible para el cultivo (suelo +fertilizante) a la siembra y Z 2.2 en función de la disponibilidad de $\text{N-NO}_3^-$ en suelo en cada estadio.	26
<b>Figura 7.</b> Concentración de $\text{N-NO}_3^-$ a la siembra en los primeros 20 cm. del perfil en función de los vectores de las variables integrantes de “LLUVIA PRE-SIEMBRA” (Dimensión 1) y “FECHA DE SIEMBRA y LLUVIA 10 DÍAS” (Dimensión 2).	29
<b>Figura 8.</b> Árbol de clasificación y regresión de concentración de $\text{N-NO}_3^-$ a la siembra en 20 cm con variables predictoras de clima (precipitaciones y temperatura) y de manejo (fecha de siembra y antecesor).	32
<b>Figura 9.</b> Árbol de clasificación y regresión de concentración de $\text{N-NO}_3^-$ en Z 2.2 a 20 cm con variables predictoras de clima (precipitaciones y temperatura) y de manejo (fecha de siembra y antecesor).	34
<b>Figura 10.</b> Frecuencia acumulada de chacras en función de la concentración de N total en planta en el estadio Z 3.0.	36
<b>Figura 11.</b> Relación entre rendimiento real, N total agregado como fertilizante (N fertilizante) y N aparente aportado por el suelo (N suelo estimado).	38

## **RESUMEN**

El correcto manejo del N resulta muy importante en los cultivos de trigo y cebada. Esto se explica por la importancia que tiene este nutriente en el crecimiento de los cultivos, por la movilidad que presenta en el suelo, por la diversidad de factores (bióticos como abióticos) que lo afectan y por el peso económico que tiene el correcto uso de este nutriente. Por lo expresado hemos estudiado con datos de 164 chacras para diferentes años (1999-2000-2001-2002) el efecto de la Temperatura, Precipitación, Fecha de Siembra y Antecesoros sobre la disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  a la siembra de cultivos de invierno. Bajas precipitaciones durante los 40 días previos a la siembra, alta temperatura del período y fecha de siembra temprana se asociaron a los mayores niveles de  $\text{N-NO}_3^-$  disponibles en el suelo a la siembra. En función de esta información, cuando las lluvias durante los 40 días previos a la siembra son menos de 20 mm y se logran siembras tempranas, es esperable que no haya déficit inicial de N para los cultivos. En siembras inmediatas a períodos de precipitaciones excesivas (135 mm) es esperable muy baja disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$ , por lo que, si no se dispone del valor de análisis, sería necesario corregir con la dosis máxima propuesta. Para las situaciones intermedias, la única herramienta válida sería el análisis de suelo correspondiente.

## **ABSTRACT**

The correct handling of nitrogen is very important variable for Wheat and Barley crops. It is explained by the importance that this nutrient has in the crop growth. This is due to the mobility that it has in the soil, the diversity of factors (biotics as well as abiotics) that it can affect, and the economic weight that the correct use of this nutrient has. According to the previously mentioned, we have studied from information of 164 farms in different years (1999- 2000- 2001- 2002) the effect of temperature, rains, date of sowing and the soil history about the availability of  $\text{N-NO}_3^-$  to sowing in winter crops. Scarce rains during the 40 days previous to sowing, high temperatures during the period and date of early sowing is associated with the highest levels of  $\text{N-NO}_3^-$  available in the soil at sowing date. In relation to this information, when the rains during the 40 days previous to sowing are less than 20 mm, and an early sowing is possible, it is expected that the crops won't have initial deficit of N. When sowings are carried out after periods of excessive rain (more than 135 mm), it is expected a very low availability of  $\text{N-NO}_3^-$ . Therefore, if analysis results are not available, it will be necessary to fertilize with the maximum proposed dose. In intermediate situations, the only valid thing to do, would be the corresponding soil analysis.

## 1. INTRODUCCIÓN

Es conocido el efecto que tienen las condiciones climáticas sobre el contenido de los nutrientes en el suelo. Para el caso de la concentración de  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo existe un efecto directo de la temperatura y precipitaciones previas al momento del muestreo. Del mismo modo, el cultivo antecesor afecta el contenido de N al momento de la siembra, tanto de trigo como de cebada. La secuencia de cultivos es, entonces, la que define cuándo preparar el suelo, así como el tipo y cantidad de rastrojo sobre el que se siembra el cultivo siguiente. El contenido de materia orgánica del suelo no es un buen estimador predictivo de las necesidades adicionales de N de los cultivos, por lo que se han desarrollado métodos de recomendación de fertilización nitrogenada en base a la determinación de formas minerales como  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo. Esto permite tener una cuantificación más directa de la disponibilidad en el momento de la siembra y en las diferentes etapas fenológicas de los cultivos.

En Uruguay, se desarrolló una propuesta para la toma de decisiones sobre cuándo y con cuánto N fertilizar al cultivo de trigo y cebada, basada en: (i) la determinación de la disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo a la siembra y cuando el cultivo tiene dos macollos (estadio Z 2.2 en la escala Zadoks), y (ii) en la determinación del estado nutricional del cultivo y estimación del potencial de rendimiento cuando el primer nudo del tallo principal está al ras del suelo (estadio Z 3.0). Si bien la propuesta ha sido validada para trigo y cebada, existe un bajo nivel de adopción de la misma, lo que se atribuye a la dificultad operativa que supone monitorear cada situación y fertilizar con N a la siembra y en dos estadios posteriores.

En el presente trabajo se analiza la fertilización nitrogenada realizada en 164 chacras de trigo y cebada durante cuatro zafras, el grado de ajuste con las dosis sugeridas de acuerdo a la estrategia propuesta para Uruguay, y la relación entre la disponibilidad de N-

$\text{NO}_3^-$  en suelo a la siembra y en el estadio Z 2.2, con las condiciones de lluvia y temperatura registradas en los días previos al muestreo.

## **2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

El área ocupada por trigo y cebada en Uruguay ha pasado de 296.334 ha en la zafra 1990-1991 a 658.300 ha en la de 2010-2011 (URUGUAY.MGAP.DIEA, 2010). El rendimiento promedio de trigo fue de 1851 kg ha<sup>-1</sup> en 1990-91 y de 1885 kg ha<sup>-1</sup> en cebada en la misma zafra, mientras que en la de 2010-2011 el rendimiento promedio de trigo fue de 3220 y en cebada 3010 kg ha<sup>-1</sup>.

Recientemente el cultivo de soja ha sustituido a estos cultivos invernales, dado los precios de la leguminosa y su fácil comercialización. Sin embargo, dadas las condiciones climáticas del país, las cuales permiten hacer un cultivo invernal, además de las nuevas disposiciones gubernamentales sobre sistemas de conservación de suelos (URUGUAY. PL, 2009) es importante que estos cultivos se mantengan en nuestros esquemas de producción. Para esto es necesario ajustar el manejo de nutrientes en estos cultivos, en especial del N para obtener rendimientos estables y altos.

Para manejar el N en estos cultivos se han propuesto diferentes modelos, con el fin de realizar un buen ajuste de la dosis de N. En los comienzos de la investigación de este nutriente en Uruguay, Oudri et al. (1976) sugirieron usar como indicador el contenido de materia orgánica (MO) a la siembra y/o nitrógeno y también toman en cuenta el uso anterior de la chacra. Capurro et al. (1982), propusieron usar el contenido de MO a la siembra como indicador del potencial de suministro de N por parte del suelo y el dato del análisis de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en suelo a la siembra como índice de la cantidad de N realmente disponible en ese momento. Dada la variabilidad de los suelos del país, así como de las condiciones climáticas, estas propuestas no tuvieron éxito, y en consecuencia no fueron adoptadas en forma generalizada en la práctica. Posteriormente se propusieron otros modelos que intentaron realizar un ajuste del N y aumentar su eficiencia de utilización.

Baethgen (1992) sugirió usar un modelo de predicción de las necesidades de N en cebada en base a la concentración de N en planta a Z 3.0 y en la determinación de un indicador del rendimiento esperado. Este autor evaluó varios indicadores: a) concentración de N total y de nitrato en planta a Z 3.0, b) cantidad de N absorbido, c) un índice relacionado con el número de macollos y el contenido de N. Sin embargo, ninguno de estos indicadores fue capaz por sí solo de presentar un comportamiento aceptable como predictor de la dosis económicamente óptima a agregar debido a la alta dispersión de los datos. El contenido de nitratos en la base de la planta a Z 3.0 no presentó un comportamiento satisfactorio para la definición de niveles de suficiencia. Hubo experimentos en los que se obtuvieron rendimientos relativos muy altos con valores de nitratos en planta muy bajos. Una de las posibles razones de este comportamiento, puede haber sido la hora del día en que se llevó a cabo el muestreo de plantas para dicho análisis en dos de los experimentos. La concentración de nitratos en la base del pseudotallo de una gramínea, depende directamente de la demanda por N de las hojas. Cuando la demanda por N es menor que la disponibilidad, ya sea porque la demanda es baja o porque la oferta es muy alta, los nitratos son absorbidos en forma masiva desde la solución del suelo por la planta, y se acumulan en la base del tallo. En cambio, cuando hay una gran demanda por N desde las hojas, el  $\text{N-NO}_3^-$  es reducido a  $\text{NH}_2$  y es utilizado para producir aminoácidos y proteínas. Esta demanda por N en una etapa dada de desarrollo varía considerablemente a lo largo del día. También en días de alta nubosidad, la fotosíntesis es menos activa, se producen menos esqueletos carbonados, y la demanda por N es menor.

Las dosis de fertilizante nitrogenado aplicadas a la siembra y/o a Z 2.2, resultaron en diferentes concentraciones de N en planta a Z 3.0. De esta manera en cada sitio experimental, se obtuvieron curvas de respuesta al N aplicado a Z 3.0 para distintos

niveles de N en planta. En cada una de estas curvas de respuesta, se calculó la dosis económicamente óptima de N (DEON): es decir la dosis de fertilizante que produjo el mejor resultado económico. Se identificaron así 4 niveles de rendimientos experimentales: (1)  $<2000 \text{ kg ha}^{-1}$ , (2)  $2000\text{-}3000 \text{ kg ha}^{-1}$ , (3)  $3000\text{-}4000 \text{ kg ha}^{-1}$ , y (4)  $>4000 \text{ kg ha}^{-1}$ , definidos como rendimiento potencial, lo que explicó más del 50% de la variabilidad obtenida en las DEON. Los 4 niveles de rendimiento potencial utilizados en el modelo, son suficientemente diferenciables como para ser definidos a nivel de chacra. Por otro lado, el momento en que ese nivel de rendimiento potencial debe ser definido es el fin de macollaje, cuando ya hay elementos como para hacerlo, considerando estado del cultivo, preparación del suelo, condiciones climáticas, etc.

Perdomo et al. (1999), trabajando en cebada cervecera estudiaron para las condiciones de Uruguay la relación entre el rendimiento relativo y las siguientes variables: contenido de materia orgánica del suelo (MOS), amonio en suelo, N mineral ( $\text{NO}_3^-$  - $\text{NH}_4^+$ ), N mineralizado por incubación anaeróbica y concentración de nitratos en suelo ( $\text{NO}_3^-$ ). Los autores encontraron que a la siembra el indicador que mejor se relacionó con el rendimiento relativo fue la concentración de N- $\text{NO}_3^-$  en los primeros 20 cm del perfil. En relación con el momento de la determinación, el momento que mayor relación mostró con el rendimiento fue el estadio de Z 2.2. A partir de esta relación se formuló un modelo de ajuste de la dosis de N en función del contenido de N- $\text{NO}_3^-$  en el suelo a siembra y a Z 2.2. Para el ajuste de la dosis de N a agregar a la siembra se requiere, además del contenido de N- $\text{NO}_3^-$  del suelo, la especificación de un “grupo de respuesta esperada a la fertilización nitrogenada”. Estos grupos dependen de factores de manejo como historia de chacra, tipo de suelo, sistema de laboreo, antecesores y largo de barbecho. Pese a ser cualitativas, estas variables permiten interpretar mejor un mismo valor de N- $\text{NO}_3^-$  en el suelo, logrando integrar el valor puntual de N- $\text{NO}_3^-$  a la siembra, con una aproximación a

la capacidad de aporte del suelo por un plazo mayor. En este trabajo que donde se combinaron diferentes dosis de N aplicadas a la siembra, en Z 2.2 y Z 3.0, se definió la necesidad de fertilizar en los tres momentos, de manera de reducir la probabilidad de pérdidas del nutriente y mantener un aporte no limitante. Se establecieron niveles críticos de  $\text{N-NO}_3^-$  en suelo (0-20 cm) a la siembra y Z 2.2 como el mejor indicador para el diagnóstico y con capacidad de pronóstico de dosis necesaria en esos estadios y la concentración de N en planta para el estadio Z 3.0.

Como lo indican Etcheverría et al., citados por Studdert y Echeverría (2006) la mayor parte del efecto de los antecesores sobre el rendimiento y el crecimiento del cultivo se debe a cambios en la disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  - provocados por las características de sus residuos. Otro factor que influye sobre cómo las características de los residuos de los antecesores inciden sobre la disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  para el trigo, es la duración del período de barbecho (Berardo, 1994). Barbechos más largos permiten un mayor período de descomposición de los residuos, lo que adquiere mayor importancia para los rastrojos con relación C:N elevado y altas cantidades. Dado que la relación entre las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  en los 0-20 cm y 0-40 cm del suelo fueron muy estrechas, ( de 0-20 cm hay aproximadamente la mitad de  $\text{NO}_3^-$  que hay de 0-40 cm), el contenido de  $\text{N-NO}_3^-$  de los primeros 20 cm del suelo es suficiente para caracterizar su disponibilidad (Hoffman et al., 1999).

Hoffman et al. (1999), validaron el modelo generado para cebada en trigo, confirmando que el rango de variación de los niveles críticos de  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo encontrado a la siembra y a Z 2.2, son similares a los de cebada cervecera en ambos momentos. El rango de N es de 16-18 ppm de  $\text{N-NO}_3^-$  a la siembra, en cambio para el estadio Z 2.2 el rango es de 13-14 ppm de  $\text{N-NO}_3^-$ . Perdomo y Bordoli (1999) también trabajaron en una red de

trigo en Uruguay, cubriendo una gran variedad de suelos y condiciones de cultivo anterior, y encontraron que el nivel crítico de  $\text{NO}_3$  a Z 2.2 fue similar, del orden de 14 ppm. Al aumentar el contenido de  $\text{N-NO}_3^-$  en suelo, se reduce la respuesta al agregado a la siembra. Por encima de las 18 ppm la probabilidad de respuesta al N es baja. Sin embargo, diferentes trabajos mostraron que por debajo del nivel crítico existió una importante dispersión en la respuesta obtenida (Hoffman et al. 1999, Perdomo y Bordoli, 1999). Esta dispersión se explica porque la magnitud de la respuesta al agregado de N en cada sitio no depende solamente de la disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$ , sino también de otros factores (Hoffman et al., 1999). Parte de esta variación es considerada por Perdomo et al. (1999), al incorporar los grupos de "respuesta esperada al nitrógeno". Para situaciones de alta respuesta esperada (rastrajos de sorgo, campo natural, chacras viejas, barbechos cortos), se recomienda agregar  $5 \text{ kg ha}^{-1}$  de N por cada 1 ppm por debajo de 16 o 18 ppm de  $\text{N-NO}_3^-$  y sólo  $3 \text{ kg ha}^{-1}$  para situaciones de baja respuesta esperada (rastrajos de soja y girasol, cultivos cabeza de rotación, barbechos largos). A su vez, se establece un máximo de N a agregar de 30 y  $40 \text{ kg ha}^{-1}$  para baja y alta respuesta esperada respectivamente. Este límite resulta de que en general no existió respuesta a dosis superiores a  $40\text{-}45 \text{ kg ha}^{-1}$  de N a la siembra (Hoffman et al., 1999) y que agregar una dosis mayor disminuye la eficiencia de uso del N en años con exceso de lluvias. Esta limitación en la cantidad máxima a agregar a la siembra es válida sólo si se vuelve a cuantificar la disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  en suelo a Z 2.2 y se fertiliza nuevamente si es necesario.

Para las condiciones de producción de Uruguay se ha encontrado que la respuesta al N agregado en Z 2.2, guarda estrecha relación con el nivel de  $\text{N-NO}_3^-$  en suelo en la capa 0-20 cm. (Hoffman et al., 1999). Hoffman et. al. (1999) mostraron que cuando la

disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo en el estadio Z 2.2 supera 14-15 ppm se alcanza el 90% del rendimiento máximo de trigo sin agregado de N. Por debajo de este rango, de igual forma que lo reportado para el contenido de  $\text{N-NO}_3^-$  a la siembra, se observó una importante dispersión en la respuesta observada (Perdomo et al., 1999, Hoffman et al., 1999). Si bien en este estadio, la planta aun absorbe bajas cantidades de N, las deficiencias determinan pérdidas importantes de potencial. La falta de N determina reducciones en el macollaje y la sobrevivencia de las espiguillas es decir el número de espiguillas fértiles (Hoffman et al., 1992). El correcto suministro de N en este estadio permite la construcción de un alto potencial de producción y, como parte del N agregado en este estadio se absorbe en torno a Z 3.0, es importante disminuir el riesgo de deficiencias de N en el período crítico. A diferencia de lo observado para los estadios anteriores la información es consistente en señalar que al estadio de Z 3.0, la relación entre la concentración de  $\text{N-NO}_3^-$  en suelo y el rendimiento relativo es muy baja o inexistente. El agregado de N en Z 3.0, permite conservar el potencial de producción definido hasta ese momento, por lo que no se debe esperar que el N corrija pérdidas de potencial generadas por deficiencias en etapas anteriores (Hoffman et al., citados por Hoffman et al., 1999). El aumento de rendimiento debido a la fertilización en esta etapa fue producto de un mayor número de granos.m<sup>2</sup>, determinado por incrementos del número de espigas por metro cuadrado y granos por espiga -1. La propuesta supone que a la siembra debe haber un mínimo de 16-18 ppm de  $\text{N-NO}_3^-$  en los primeros 20 cm del suelo para no limitar el crecimiento del cultivo, que este valor debe mantenerse por encima de 11 a 13 ppm de  $\text{N-NO}_3^-$  en Z 2.2 y que el cultivo debe tener más de 4,2% de N en planta en Z 3.0. En cualquiera de los tres momentos, si se determinan valores inferiores, deberá corregirse con el agregado de N en función de los modelos desarrollados para cada estadio. En el único estadio en el que contempla el rendimiento

potencialmente alcanzable es en Z 3.0. En este estadio no se define un rendimiento objetivo, sino que se estima un rendimiento máximo esperable para cada situación dada.

En Argentina existen varias formas de evaluar la necesidad de N para cultivos de invierno. Una de ellas fue propuesta por Gonzales Montaner (1991). La mayor eficiencia de respuesta a la fertilización nitrogenada se logra con una disponibilidad de N por hectárea en los primeros 60 cm del perfil (N suelo + N fertilizante) de 125 kg. La decisión de fertilización tiene en cuenta el estado hídrico del suelo. La fertilización es factible siempre que el estado hídrico (EH) sea mayor al 75 % del agua capaz de contener el suelo a capacidad de campo, ya sea a la siembra o cuando el cultivo de trigo se encuentre con 2 hojas expandidas. Si  $EH > 0,75$ , la dosis a aplicar entre siembra y hasta 2 hojas surge de la diferencia entre una cantidad objetivo ( $125 \text{ kg de N ha}^{-1}$ ) y los disponible en el suelo. En caso de EH a la siembra sea limitante ( $EH < 0,75$ ), se recomienda no agregar N y volver a evaluar a los 30 días pos-siembra. Si las lluvias posteriores a la siembra modifican el EH, se propone fertilizar. En condiciones de  $EH > 0,75$  el momento de fertilización dependerá de la cantidad inicial de N disponible en el suelo a la siembra. Si el N fuese mayor a  $69 \text{ kg.ha}^{-1}$  se debería fertilizar cuando el trigo esté en el estado espiga "1 cm". Si el N a la siembra fuese menor a  $69 \text{ kg.ha}^{-1}$  se recomienda una fertilización en el período siembra-2 hojas expuestas. La eficiencia de respuesta a la fertilización obtenida con el modelo propuesto, fue de  $15.3 \text{ kg de trigo kilogramo de N aplicado}^{-1}$ , superando en más del 70 % de los casos en estudio una relación ( $\text{kg trigo Kg urea}^{-1}$ ) de 4:1 (González Montaner et al., 1991). La propuesta supone que: a) las pérdidas por lixiviación (escasas para la zona) o por ineficiencias de absorción son compensadas por la mineralización durante la encañazón, b) la disponibilidad de agua condiciona o modifica la oportunidad de

fertilización, c) la validez de los criterios tomados involucra lotes con una rotación netamente agrícola, labranza convencional y girasol como antecesor.

Las diferencias con la propuesta para Uruguay radica en que la producción se realiza en condiciones edafo-climáticas diferentes: a) en Argentina el estado hídrico del suelo condiciona la decisión de fertilización con N antes que la cantidad de  $\text{NO}_3$  acumulada en el suelo, en cambio en Uruguay, hay pérdidas importantes por lixiviación ya que existen eventos de precipitación muy abundantes lo que lleva a chequear en diferentes momentos del ciclo del trigo y la cebada. En Uruguay, la disponibilidad de agua en el suelo no condiciona la oportunidad de fertilización sino que incrementa la probabilidad de perder el N aplicado. En el SE de la Provincia de Buenos Aires, donde existe una elevada probabilidad de ocurrencia de excesos hídricos al comienzo de la estación de crecimiento del trigo, Barbieri et al. (2009), determinaron que el muestreo al momento del macollaje mostró mayor coeficiente de correlación que a la siembra (59% vs 36%). El menor umbral de N Disponible (se define como los  $\text{kg N ha}^{-1}$  presentes en el suelo más los aplicados en forma de fertilizante) determinado para la aplicación de N al macollaje se explica en parte por la existencia de menores pérdidas de N, particularmente por lavado de nitratos (Barbieri et al., 2009), como consecuencia de la elevada probabilidad de excesos hídricos durante los estadios iniciales del ciclo del cultivo (Calvino y Sadras, 2002; Reussi Calvo y Etcheverría, 2006). En cambio el trabajo de Bono y Alvarez (2009), realizado en la región semiárida y subhúmeda pampeana donde es poco probable que existan excesos de agua en el suelo, el momento de aplicación de N no tuvo efecto significativo sobre el rendimiento, tanto en casos donde la humedad a la siembra era baja y aumentaba al macollaje, como en situaciones donde inicialmente se disponía de alta humedad y el suelo se secaba posteriormente. Los resultados se explican por las escasas pérdidas de N que se producen en las etapas iniciales del ciclo del cultivo (Alvarez y Steinbach, citados por Bono y Alvarez, 2009).

Otra alternativa es usar el modelo de balance descrito por Alvarez (2007), el cual considera el requerimiento de N del cultivo y la oferta del suelo, calculándose la dosis del N como la diferencia entre ambos. En ese modelo se asume una cantidad de N requerida por el cultivo de trigo de 30-32 kg de N ton grano<sup>-1</sup>, un 25 a 35% de N residual, una mineralización de N del orden de 0,6 a 0.8 % del N orgánico, liberación de N por los residuos, y pérdidas de N por volatilización, desnitrificación y lixiviación del orden de 0 a 10% de la disponibilidad total de N. Además, este balance tiene en cuenta el contenido de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el suelo a la siembra 0-60 cm. Con este modelo se obtiene la estimación de las necesidades del N a partir del rendimiento esperado del cultivo y la oferta de N del suelo acumulado al momento de la siembra y mineralizado durante el ciclo del cultivo. Las limitaciones de esta metodología en la formulación de recomendaciones de fertilización son: 1) la variabilidad de los rendimientos esperados y los realmente alcanzados, ya que la estimación de rendimiento se hace temprano en el ciclo del cultivo, 2) la correcta estimación del N mineralizado, 3) las pérdidas de N por el proceso de lixiviación.

El modelo de balance se evaluó por Hoffman en el estadio Z 2.0, en base a la misma propuesta evaluada por Prystupa et al. (2008) en cebada cervecera. Para el año 2008, el ajuste entre la dosis predicha por el tratamiento de N objetivo y la dosis óptima observada, fue muy bajo ( $R^2 = 0,09$ ; ns). Eliminando el error natural de estimación de rendimiento, y considerando el rendimiento real observado a la dosis óptima, el ajuste fue superior aunque aún bajo y no significativo ( $R^2 = 0,18$ , Hoffman y Perdomo, 2011). El muestreo de suelos en ésta propuesta se hace una sola vez y temprano en el ciclo de cultivo (algunos muestrean a la siembra, otros en el estadio Z 2.0), por lo que, para condiciones de excesos hídricos probables, este único dato de N en el suelo sería muy temprano en el ciclo de los cultivos como para ser utilizado con éxito como estimador de la respuesta esperada al fertilizante nitrogenado en trigo y cebada. "En este modelo se asume que el rendimiento depende exclusivamente de la disponibilidad de N y que existe respuesta

lineal del rendimiento al N hasta el objetivo de rendimiento. Estas dos asunciones no son ciertas, especialmente en niveles medios y altos de disponibilidad de N donde la respuesta del cultivo tiende a ser curvilínea.” (Alvarez 2007)

### 3. OBJETIVOS

- I) Analizar el grado de ajuste entre las dosis recomendadas de fertilización nitrogenada a la siembra y Z 2.2, en función de la disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo, y las cantidades reales aplicadas por un grupo de productores de trigo y cebada en Uruguay, durante cuatro zafras consecutivas.
  
- II) Cuantificar la relación entre temperatura media del aire y precipitaciones en el período pre-siembra, y la disponibilidad inicial de N para cultivos de invierno.
  
- III) Proponer rangos de agregado de N a la siembra y en macollaje en función de las condiciones ambientales del período pre-siembra y antecesor.

#### 4. HIPÒTESIS

Existe un bajo nivel de adopción del modelo de recomendación de fertilización nitrogenada propuesto para trigo y cebada en Uruguay, aún en aquellos productores que realizan los análisis de suelo y planta necesarios.

La falta de ajuste resulta de la dificultad de aplicar la cantidad recomendada modificando la dosis y/o el tipo de fertilizante de manera continua, por lo que se aplican distintas dosis para un mismo valor de disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  en suelo.

Como alternativa es posible establecer rangos de recomendación de N a la siembra y al estadio de Z 2.2 de cultivo de invierno considerando las condiciones de precipitaciones y temperatura de los días previos a la siembra.

## **5. MATERIALES Y MÉTODOS**

Se utilizó una base de datos de 164 chacras sembradas con trigo y cebada en los años 1999, 2000, 2001 y 2002, ubicadas en un radio de 35 km de la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni (EEMAC) de la Facultad de Agronomía, Paysandú. Para cada chacra se dispone de la siguiente información suministrada por UNICAMPO SRL-Asesoría Técnica Agropecuaria:

### **Análisis del suelo 0-20 cm:**

Fósforo disponible en el suelo a la siembra (Bray I),

N como Nitratos ( $\text{N-NO}_3^-$ ) disponible en 0-20 cm a la siembra

N como Nitratos ( $\text{N-NO}_3^-$ ) disponible en 0-20 cm al estadio Z 2.2 del cultivo

### **Manejo del cultivo:**

Cultivo: trigo o cebada

Cultivo antecesor

Fecha de Siembra

Fertilización a la siembra (Fósforo y N)

Fertilización nitrogenada en Z 2.2

N foliar a Z 3.0 (%N)

Fertilización nitrogenada en Z 3.0

Rendimiento en grano ( $\text{kg ha}^{-1}$ )

### **Información climática**

Se tomó como referencia la información de temperatura media diaria y precipitaciones registrada en la casilla meteorológica de la EEMAC.

## 5.1. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Se realizó una descripción del manejo de los cultivos para aquellas variables relacionadas con el aporte de  $\text{N-NO}_3^-$  del suelo. Para ello se consideró cada chacra como un dato, independiente de su superficie, y se calculó la frecuencia de chacras por variable de manejo para cada año.

Se analizó la relación entre la cantidad de N agregado en cada chacra y la recomendación surgida utilizando los modelos propuestos para trigo y cebada en Uruguay por Perdomo et al. (1999). A la siembra se consideró el  $\text{N-NO}_3^-$  disponible en 0-20 cm. y el Grupo de Respuesta esperada a N en función del tipo de suelo, antecesor y tiempo de barbecho.

Para cada chacra se estimó el aporte del suelo al momento de la siembra y al estadio Z 2.2 tomando una densidad aparente de  $1.2 \text{ g/cm}^3$  para los primeros 20 cm. del perfil. Se estimó el aporte de N tomando  $\text{N-NO}_3^-$  del suelo más el aporte del fertilizante.

Tomando como referencia la fecha de siembra, la lluvia y temperatura media del aire registradas en la EEMAC, se estimó la precipitación ocurrida durante los 10, 20, 30 y 40 días pre-siembra y los grados días acumulados durante los 10 días pre-siembra para cada chacra. Estas variables estimadas fueron utilizadas para caracterizar el ambiente previo a la siembra y a Z 2.2. Para describir la relación entre la disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo y las variables de ambiente determinadas, se realizaron dos análisis: I. análisis de componentes principales utilizando el Procedimiento PRINCOM de paquete estadístico SAS (Systems del SAS Institute, Versión 6.11, del año 1996), considerando todas las variables de ambiente (lluvia y temperatura pre-siembra y el día de siembra). Una vez definidos los “ambientes” se los relacionó gráficamente con la disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo. De esta manera se definieron combinaciones de lluvia acumulada, temperatura media y fecha de siembra, asociadas a rangos de disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$ .

II. se construyeron árboles de clasificación y regresión (CART) utilizando programa JMP (versión 9).

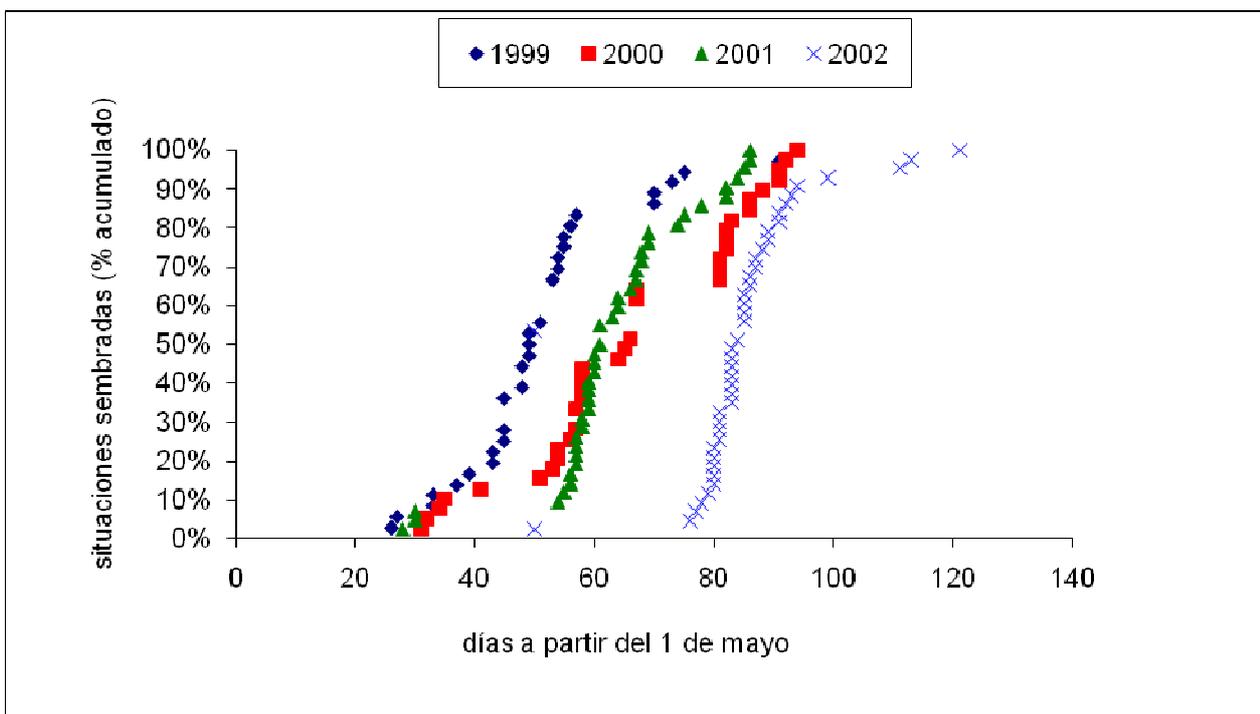
La variable de respuesta analizada fue la concentración de  $\text{N-NO}_3^-$  a la siembra y en Z 2.2 en función de las variables de ambiente, día de siembra y grupo de respuesta esperada a nitrógeno definida en base a Perdomo et al. (1999).

En base al valor medio de  $\text{N-NO}_3^-$  (ppm) de cada rama, se propuso rangos de N a agregar a la siembra y Z 2.2.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. CONDICIONES CLIMÁTICAS DURANTE EL PERÍODO MAYO - AGOSTO DE CADA AÑO Y SU RELACIÓN CON FECHA DE SIEMBRA

La Figura 1 muestra la distribución de las fechas de siembra efectivamente realizadas por año. Esta distribución es una de las consecuencias de la ocurrencia o no de precipitaciones en el período mayo-agosto.



**Figura 1.** Frecuencia acumulada de chacras sembradas a partir del 1º de mayo en el período 1999-2002 en 164 situaciones encuestadas.

En el año 2002 la siembra se realizó más tarde que en el resto de los años debido a que se produjeron precipitaciones hasta mediados de junio. Se suma a lo anterior la alta frecuencia de siembra sobre rastrojos de cultivos de verano de segunda (Cuadro 2). En cambio, en el año 2000, que también hubo precipitaciones abundantes al inicio de la estación de siembra, la distribución fue menos concentrada, lo cual se asocia al hecho de que el 80% de la superficie fue sembrada como cabeza de rotación después de pradera y rastrojos de cultivos de invierno del año anterior. En los años 1999 y 2001 la siembra fue

al inicio de la estación de siembra y concentrada dentro del rango óptimo para la zona (1º de junio - 15 de julio), como consecuencia de bajas precipitaciones en el período. En 1999 las precipitaciones de junio fueron escasas y en el 2001 el período de lluvias fue durante mayo.

Para el promedio de las situaciones, las precipitaciones durante los 10 días previos a la siembra fueron muy bajas. El resultado es esperable, ya que la siembra se puede realizar sólo cuando no se producen lluvias excesivas durante los días previos (Cuadro 1) .

**Cuadro 1.** Precipitación promedio 10, 20, 30, 40 días antes de la siembra de cada chacra encuestada y temperatura media acumulada en los 10 días antes de la siembra para los años 1999-2001.

	Año 1999	Año 2000	Año 2001	Año 2002
PRECIPITACIÓN 10 DÍAS.	9	7	11	6
PRECIPITACIÓN 20 DIAS.	33	52	30	33
PRECIPITACIÓN 30 DIAS.	41	85	106	72
PRECIPITACIÓN 40 DIAS.	58	119	167	112
TEMPERATURA ACUMULADA 10 DIAS.	12	10	11	9
Calificación del período pre-siembra	SECO	INTERMEDIO	HUMEDO	INTERMEDIO

Al considerar 20 días pre-siembra, las lluvias del año 2000 fueron aproximadamente 20 mm más que en los otros años, lo que indica una condición más húmeda. Los registros de 30 y 40 días pre-siembra permiten definir los años en base a condiciones pre-siembra como “Seco” al año 1999, y “Húmedo” al año 2001. Los años 2000 y 2002 serían “Intermedio”.

La calificación corresponde al período pre-siembra el que, como se comentó, se ubicó en días calendario diferente en cada chacra y año.

## 6.2. PROPORCIÓN DE SIEMBRA DE LOS CULTIVOS DE INVIERNO SOBRE DIFERENTES ANTECESORES.

**Cuadro 2.** Proporción de cultivos antecesores a la siembra de los cultivos de invierno para los distintos años considerados y respuesta esperada a la aplicación de N.

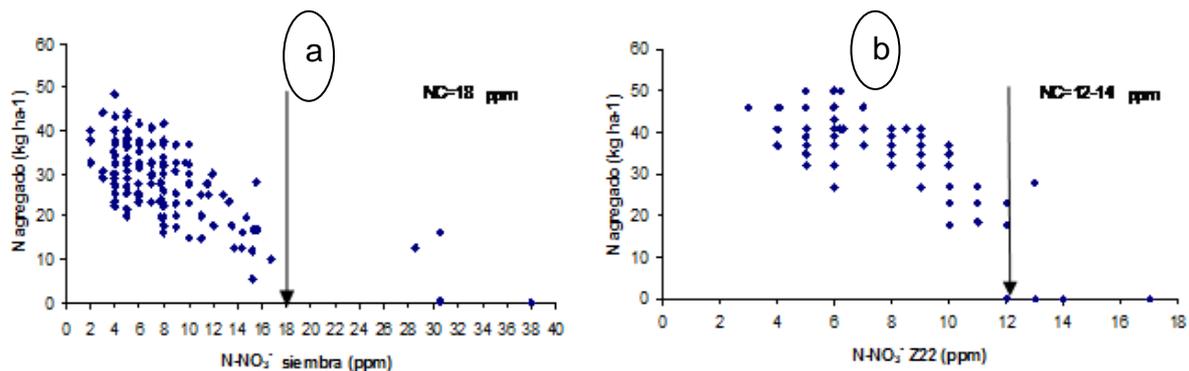
Criterio	Respuesta esperada al N	ANTECESOR	1999	2000	2001	2002
Cultivos de verano de 1era	BAJA	Girasol/Soja/Moha (1)	<b>0.36</b>	0.05	<b>0.27</b>	0.21
Cultivos de verano de 2da	BAJA	Girasol /Soja (2)	0	0.10	0.00	<b>0.30</b>
Rastrojos de difícil descomposición	ALTA	Maíz/Sorgo (3)	0.14	0.03	0.14	0.09
Rastrojos de cultivos de invierno	BAJA	Avena, trigo, cebada (4)	0.19	<b>0.44</b>	0.23	0.07
Cultivos cabeza de rotación	ALTA	Campo Natutal/Pradera vieja engramillada (5)	<b>0.31</b>	<b>0.36</b>	<b>0.34</b>	<b>0.30</b>

Aproximadamente un 60% de las situaciones corresponden a la calificación de “Baja respuesta esperada al N” y un 40% a “Alta respuesta esperada” según la propuesta de Perdomo et. al. (1999). En el año 1 (1999) y el año 3 (2001) los antecesores fueron principalmente rastrojos de cultivos de verano de primera del año anterior y praderas viejas. En cambio en el año 2 (2000) trigo o cebada y praderas fueron los más

frecuentes. En el año 4 (2002) un 30% de la superficie se sembró sobre rastrojos de cultivos de verano de segunda, lo que implica cosecha tarde.

### 6.3. AJUSTE ENTRE LAS DOSIS RECOMENDADAS DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA A LA SIEMBRA Y MACOLLAJE EN FUNCIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE $\text{N-NO}_3^-$ EN EL SUELO Y LAS CANTIDADES REALES APLICADAS.

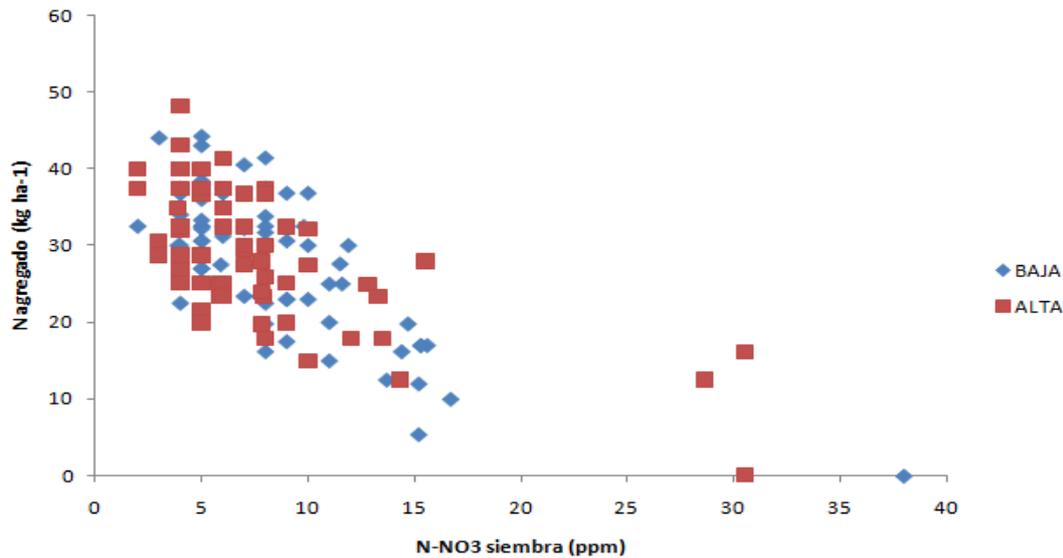
En la Figura 2 se presenta la relación encontrada entre la disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  cuantificada a la siembra y en Z 2.2 de cada chacra y la fertilización de N efectivamente realizada.



**Figura 2:** N agregado a la siembra ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) (a) y en Z 2.2 (b) en función del  $\text{N-NO}_3^-$  (ppm) en los primeros 20 cm del suelo. NC= Nivel crítico. La flecha indica el nivel crítico considerado por Perdomo et al. (1999) para cada estadio.

En ambos momentos, si bien existió una tendencia negativa entre  $\text{N-NO}_3^-$  acumulado en el suelo y N efectivamente agregado como fertilizante dentro del rango de respuesta esperada, el coeficiente de determinación para la relación entre ambas variables fue bajo (0,37 y 0,52 para alta y baja respuesta esperada a la fertilización nitrogenada respectivamente). Existió una importante variación en la dosis de N aplicada frente a un mismo valor de disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  en suelo. A su vez, se observa una

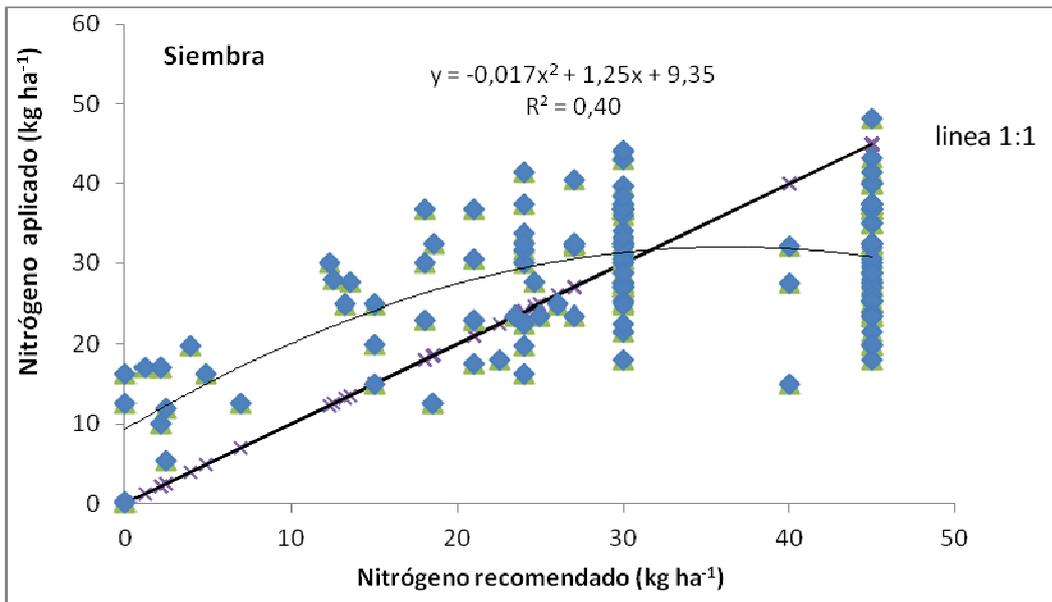
superposición de valores para chacras definidas como de alta y baja respuesta esperada a la fertilización nitrogenada (Figura 3).



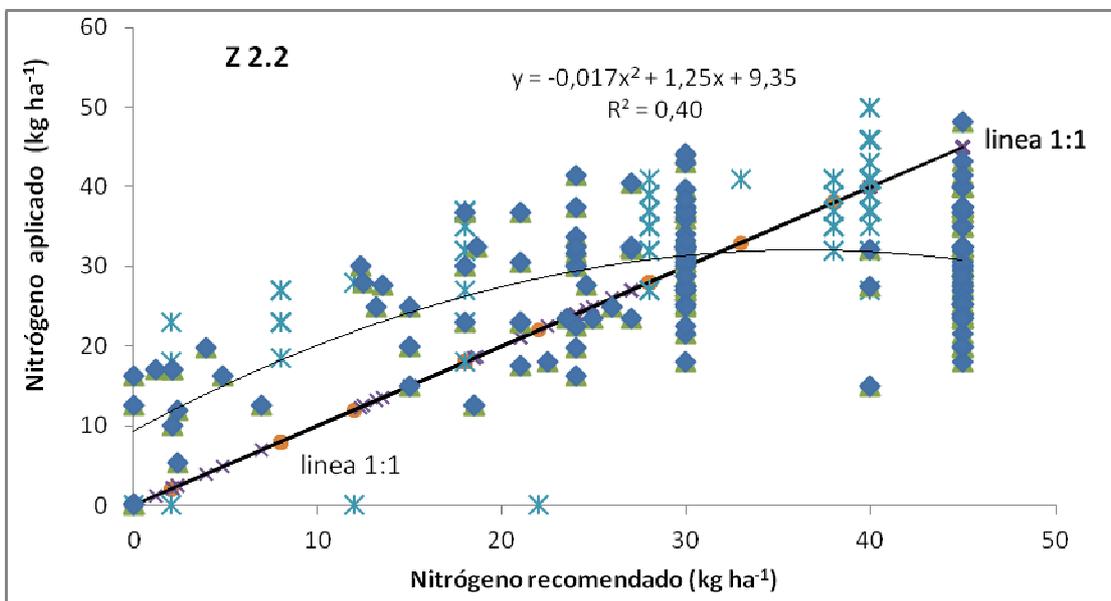
**Figura 3.** N agregado a la siembra ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) en función del  $\text{N-NO}_3^-$  (ppm) en los primeros 20 cm del suelo para chacras de alta (A) y baja (B) respuesta esperada a la fertilización.

A la siembra y en Z 2.2 se fertilizaron con N el 99% de las chacras, las que tuvieron una disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo menor al valor crítico establecido para cada estadio. El rango de N agregado estuvo entre cero (2 chacras con más de 30 ppm de  $\text{N-NO}_3^-$  a la siembra) y un máximo de aproximadamente  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  en ambos momentos. Dos chacras estuvieron por encima del valor crítico a la siembra e igualmente se fertilizaron con N. Cuando el nivel de  $\text{N-NO}_3^-$  a Z 2.2 fue menor a 6 ppm la cantidad de N aplicado fue el máximo recomendado para el estadio, que varía entre  $40\text{-}50 \text{ kg ha}^{-1}$  de N. Cuando la disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  estuvo entre 6 y 10 ppm la corrección varió entre  $15\text{-}40 \text{ kg ha}^{-1}$  N. Entre 11 y 14 ppm lo recomendado sería de  $0\text{-}15 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, sin embargo se fertilizó por encima de esas cantidades.

La relación entre N recomendado y N aplicado fue baja en ambos estadios (Figura 4 y 5).



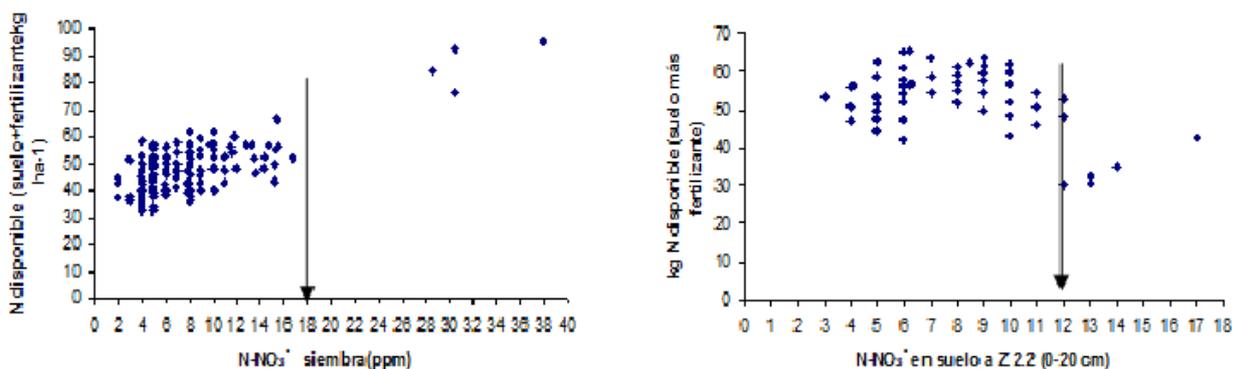
**Figura 4.** Relación entre N recomendado y N aplicado para cada chacra a la siembra ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).



**Figura 5.** Relación entre N recomendado y N aplicado para cada chacra en Z 2.2 ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).

Estos resultados muestran que existe una baja adopción de la dosis de N recomendada en función de la disponibilidad de  $N-NO_3^-$  en el suelo, aun en aquellos productores que realizan los muestreos de suelos correspondientes. Si bien existe una tendencia a fertilizar con mayores dosis donde la deficiencia es mayor, existe una variabilidad importante establecida en rangos de N aplicado para valores similares de N en el suelo. A la siembra se sobrefertilizó cuando la recomendación fue menor a  $30 \text{ kg ha}^{-1}$  y se aplicó una dosis menor a la recomendada en las situaciones de mayor deficiencia de N. En Z 2.2 también se registró una tendencia a sobrefertilizar en las dosis menores recomendadas. El grado de ajuste es mejor en Z 2.2 que a la siembra ( $r^2$  0,56 y 0,40 respectivamente).

La propuesta de manejo del N no contempla un rendimiento objetivo para definir la dosis de N a agregar a la siembra o en Z 2.2, ya que en esos momentos, no es posible estimar el rendimiento alcanzable. Sin embargo, relacionando la disponibilidad de  $N-NO_3^-$  en el suelo en los primeros 20 cm del perfil con la oferta de N para el cultivo compuesta por N en el suelo más N agregado como fertilizante por el productor, resulta que en ambos momentos se logra una disponibilidad media de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de N en 20 cm de suelo. (Figura 6).



**Figura 6.** N disponible para el cultivo (suelo+fertilizante) a la siembra y Z 2.2 en función de la disponibilidad de  $N-NO_3^-$  en suelo en cada estadio. NC= Nivel crítico. La flecha indica el nivel crítico considerado por Perdomo et al. (1999) para cada estadio.

En promedio, el modelo propuesto determina  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de N disponible para el cultivo a la siembra. Cuando la disponibilidad en el suelo es mayor a 18 ppm, la recomendación es no fertilizar, ya que el suelo tiene acumulado a ese momento más de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de N disponibles para el cultivo. Fueron muy pocas las chacras donde la cantidad de  $\text{N-NO}_3^-$  disponible fue elevado (alrededor de 80-90 kg. de N). Estas chacras tuvieron por encima de 30 ppm  $\text{N-NO}_3^-$  a la siembra y no hubo agregado de fertilizante, o sea que el suelo fue el que acumuló esos niveles de N. Esto puede estar asociado con el tipo de barbecho, el tipo de rastrojo, la historia de chacra y los niveles de precipitación y temperatura previos a la siembra.

En síntesis, la propuesta de monitoreo de la disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo para fertilizar cultivos de invierno en Uruguay tendría implícita una cantidad mínima de N necesaria entre el aporte del suelo y el fertilizante que debe mantenerse en el tiempo. Cuando la disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo se reduce entre siembra y Z 2.2, implica que la absorción supero al aporte o que una parte importante de lo disponible se perdió de la capa 0-20cm y es necesario volver a fertilizar. Como la reducción del aporte entre siembra y Z 2.2 fue frecuente, (el 97 % de las chacras fueron fertilizadas en los dos momentos), se podría plantear como alternativa fertilizar con dosis superiores a la siembra, elevando la cantidad disponible y llegar a Z 2.2 con un aporte menor pero suficiente aun. Esta alternativa ha sido evaluada experimentalmente por Díaz Zorita (2000) y solo resultó exitosa por las escasas precipitaciones invernales que permiten la total incorporación del N del fertilizante con anterioridad a la floración de los cultivos. La incertidumbre existente al momento de la siembra sobre cuándo y cuánto lloverá en cada situación particular justifica la estrategia de diferir la fertilización y aplicar en base a las necesidades definidas para cada estadio. La diferencia con Argentina es que en Uruguay lo más común es que el suelo en los meses de invierno se encuentre con exceso de agua por lo que es probable que se produzca drenaje de agua y con ella se pierde N.

#### 6.4. RELACIÓN ENTRE CONDICIONES CLIMÁTICAS Y DISPONIBILIDAD DE $\text{N-NO}_3^-$ EN EL SUELO.

Para caracterizar las condiciones climáticas previas a la siembra de cada chacra monitoreada, se realizó un análisis de Componentes Principales, incluyendo lluvia y temperatura previas al muestreo de suelo a la siembra y Z 2.2 y la fecha de siembra tomadas como días a partir del 1º de marzo de cada año (Cuadro 3).

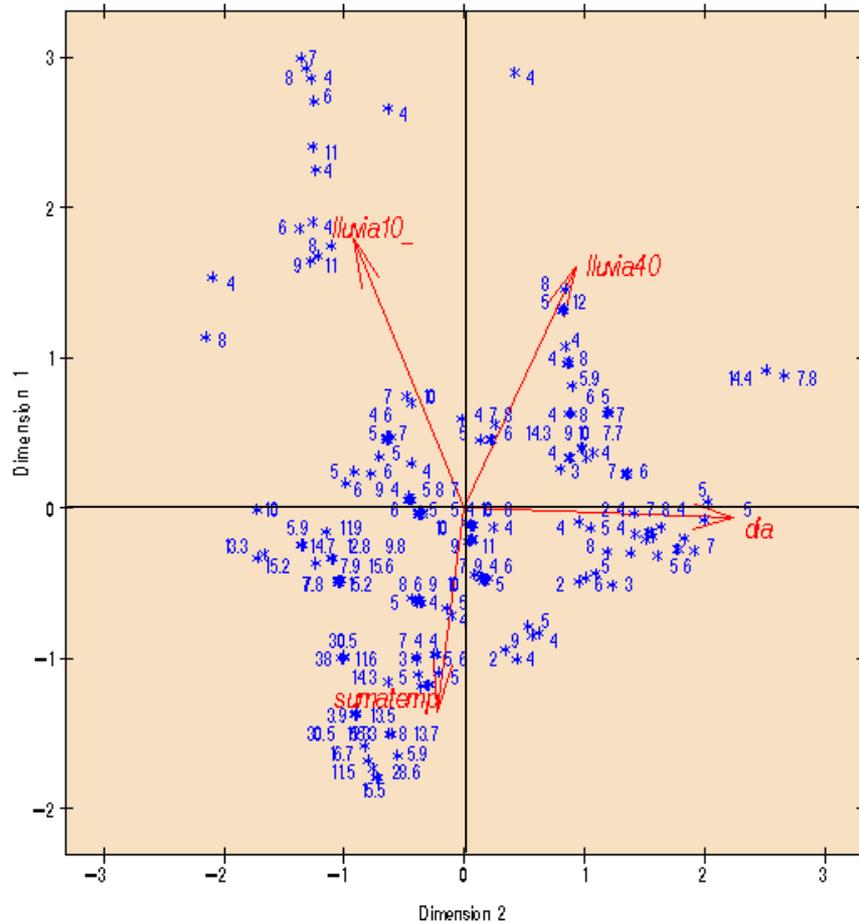
**Cuadro 3.** Componentes principales definidos para las condiciones climáticas pre-siembra, proporción de la variación explicada y sus coeficientes.

Variable	Prin1	Prin2	Prin3	Prin4
	Lluvia 40 días pre-siembra	Fecha siembra lluvia 10 días	Temperatura pre siembra	Fecha de siembra Temperatura
Día de siembra	0.117	0.591	-0.443	0.619
Suma temperatura	-0.216	0.117	0.796	0.534
Lluvia 10	0.354	-0.625	0.033	0.317
Lluvia 20	0.494	-0.264	-0.103	0.352
Lluvia 30	0.571	0.242	0.136	-0.202
Lluvia 40	0.494	0.343	0.375	-0.259
R <sup>2</sup> parcial	0.4	0.2	0.16	0.15
R <sup>2</sup> acumulado	0.4	0.6	0.76	0.91

El 76% de la variabilidad observada en las condiciones pre-siembra se explicaron por una combinación de las variables día de siembra, sumatoria de temperatura media diaria 10 días pre-siembra y las precipitaciones ocurridas en los 10, 20, 30 o 40 días previos a la siembra. El Componente Principal 1 explica el 40% de la variación y en base al valor absoluto de los coeficientes de las variables que lo integran se lo denominará como “LLUVIA PRE-SIEMBRA”. Al acumular el Componente Principal 2, se logra explicar el 60% de la variación. Dado el valor del coeficiente del día de siembra, se lo denominará como “FECHA DE SIEMBRA y LLUVIA 10 DÍAS”. Considerando el Componente Principal

3 con el que se logra explicar el 76% de la variación de condiciones de lluvia y temperatura pre-siembra y se lo denominará como “TEMPERATURA PRE-SIEMBRA”

En la Figura 7 se presenta la relación entre la concentración de  $\text{N-NO}_3^-$  a la siembra en los primeros 20 cm. del perfil y los componentes principales 1 y 2, nuevas variables generadas para caracterizar el ambiente de cada chacra.



**Figura 7.** Concentración de  $\text{N-NO}_3^-$  a la siembra en los primeros 20 cm. del perfil en función de los vectores de las variables integrantes de “LLUVIA PRE-SIEMBRA” (Dimensión 1) y “FECHA DE SIEMBRA y LLUVIA 10 DÍAS” (Dimensión 2).

En el cuadrante inferior izquierdo se ubicaron las chacras con alta disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  a la siembra en los primeros 20 cm. El mismo representa situaciones con valores negativos de la dimensión 1 y 2, por lo tanto, menores lluvias acumuladas en los 40 días previos a la siembra y fecha de siembra temprana con relativamente alta temperatura acumulada en los 10 días previos a la siembra. En el cuadrante superior izquierdo predominan concentraciones menores a 10 ppm de  $\text{N-NO}_3^-$  a la siembra, asociadas a alta cantidad de lluvia previa a siembras tempranas y baja temperatura. En toda la mitad derecha predominan bajas concentraciones de  $\text{N-NO}_3^-$  lo que marca un efecto principal de la lluvia y siembra tardía, esto concuerda con resultados presentados por Cassanova (1999), en la cual relaciona la disponibilidad de N con los datos de precipitaciones.

El grupo de chacras con disponibilidad mayor de  $\text{N-NO}_3^-$  a la siembra fue aquellas en las que se sembraron con menor cantidad de precipitaciones acumuladas en los 40 días previos y mayor temperatura, variables ambas que se asocian a la mayor probabilidad de acumular N en el suelo.

En el cuadro 4 se resumen las precipitaciones acumuladas en los 40 días pre-siembra y temperatura media de 10 días pre-siembra asociada al valor medio de  $\text{N-NO}_3^-$  a la siembra.

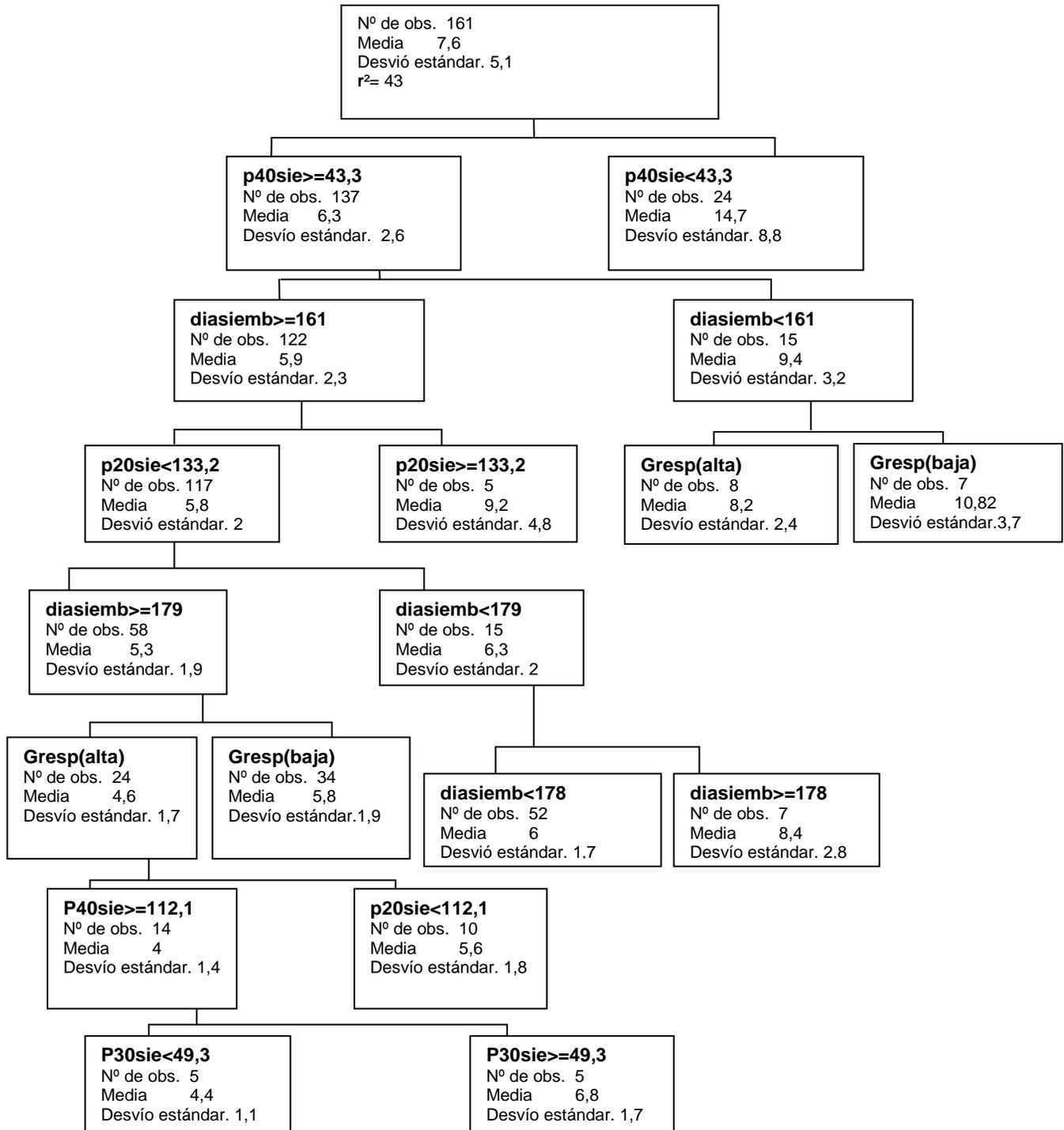
**Cuadro 4.** Precipitaciones acumuladas 40 días pre-siembra y sumatoria de temperatura media diaria 10 días pre-siembra para cuatro rangos de concentración de  $\text{N-NO}_3^-$ .

N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> a la siembra (ppm)				
	<5	5-10	10-15	>15
Precipitación 40 d	135	128	109	21
Temperatura 10 d	157	143	149	202

Los resultados muestran que se podría esperar disponibilidades de  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo a la siembra muy baja (menos de 5 ppm) cuando las precipitaciones 40 días antes de la siembra son superiores a los 135 mm y la temperatura media inferior a los 15 °C en los 10 días previos a la siembra. En estas situaciones se recomendaría agregar la cantidad máxima de N surgida del modelo propuesto por Perdomo et al. (1999) ( $45 \text{ kg N ha}^{-1}$ ). Por otro lado, cuando la precipitación es menor a 21 mm. y la temperatura elevada, se estaría en condiciones alto  $\text{N-NO}_3^-$  disponible en el suelo, por lo que la recomendación de fertilización a la siembra sería entre 0 y  $15 \text{ kg de N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$ , y serían las situaciones en las que más atención habría que dedicar para muestrear y corregir en función del aporte del suelo.

No se logró ajustar ningún modelo matemático con un ajuste aceptable para predecir el valor de disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo, por lo que sólo sería posible trabajar con rangos de disponibilidad esperados.

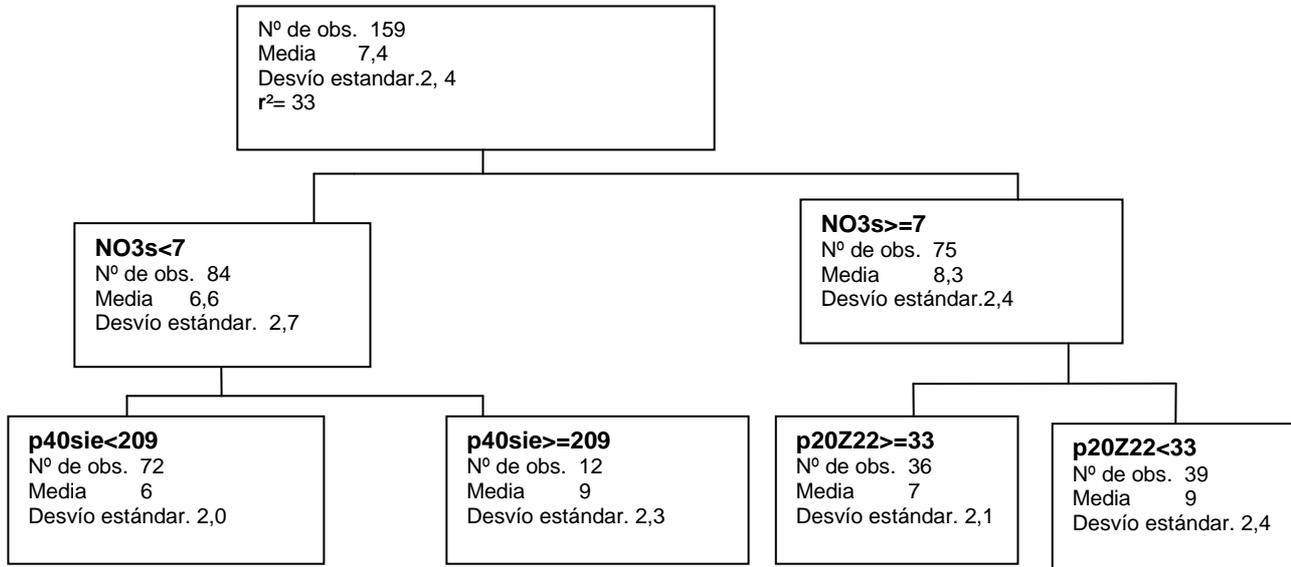
Para determinar la posibilidad de establecer rangos esperables de  $\text{N-NO}_3^-$  a la siembra en función de las variables de ambiente que caracterizan a cada chacra se realizó un árbol de clasificación y regresiones para  $\text{N-NO}_3^-$  a la siembra y Z 2.2. (Figuras 8 y 9).



**Figura 8.** Árbol de clasificación y regresión de concentración de  $N-NO_3^-$  a la siembra en 20 cm con variables predictoras de clima (precipitaciones y temperatura) y de manejo (fecha de siembra y antecesor). **p40sie** = precipitaciones 40 días antes de la siembra; **diasiemb** = días a la siembra a partir del 1° de enero de cada año; **Gresp(alta)** = grupo de respuesta alta; **Gresp(baja)** = grupo de respuesta baja. **p20sie** = precipitaciones 20 días antes de la siembra; **p30sie** = precipitaciones 30 días antes de la siembra.

Considerando todas las variables disponibles, las precipitaciones 40 días pre-siembra resultó la más relevante en determinar la concentración de  $\text{N-NO}_3^-$  a la siembra. Esta primera división separó situaciones con precipitaciones menores a 44 mm, que acumularon  $15 \pm 9$  ppm de  $\text{N-NO}_3^-$  de aquellas que recibieron 44 mm o más de precipitaciones en igual período que acumularon  $6 \pm 3$  ppm de  $\text{N-NO}_3^-$  al momento de la siembra del cultivo de invierno. Siguiendo el modelo propuesto por Perdomo et. al., 1999, la fertilización recomendada a la siembra de las situaciones con precipitaciones superiores a 44 mm sería la fertilización de 35 a 45  $\text{kg ha}^{-1}$  de N para situaciones de baja y alta respuesta esperada a la fertilización con N, respectivamente. El grupo de chacras que recibió 44 mm o más de precipitaciones se dividió en función de la fecha de siembra. En siembras anteriores al 10 de junio (día 161 del año), la media de  $\text{N-NO}_3^-$  a la siembra fue de  $10 \pm 3$  ppm y en las siembras posteriores fue de  $6 \pm 2$  ppm., lo que determinaría una recomendación de fertilización diferencial de entre 18 a 40  $\text{kg ha}^{-1}$  de N para grupos de baja y alta respuesta contra 30 a 45  $\text{kg ha}^{-1}$  de N respectivamente. Las divisiones posteriores definidas por precipitaciones, nuevos rangos de siembra y respuesta esperada a la fertilización con N no establecieron valores medios que justifiquen diferenciar la recomendación de fertilización nitrogenada a la siembra.

A Z 2.2, la variable de mayor relevancia en determinar la concentración de  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo fue la concentración disponible a la siembra (Figura 9).



**Figura 9** . Árbol de clasificación y regresión de concentración de  $\text{N-NO}_3^-$  en Z 2.2 a 20 cm con variables predictivas de clima (precipitaciones y temperatura) y de manejo (fecha de siembra y antecesor). **p40sie** = precipitaciones 40 días antes de la siembra. **p20Z22** = precipitaciones 20 días antes de Z 2.2., **diasiem** = días a la siembra,  $\text{N-NO}_3^-_s$  = nitrato a la siembra.

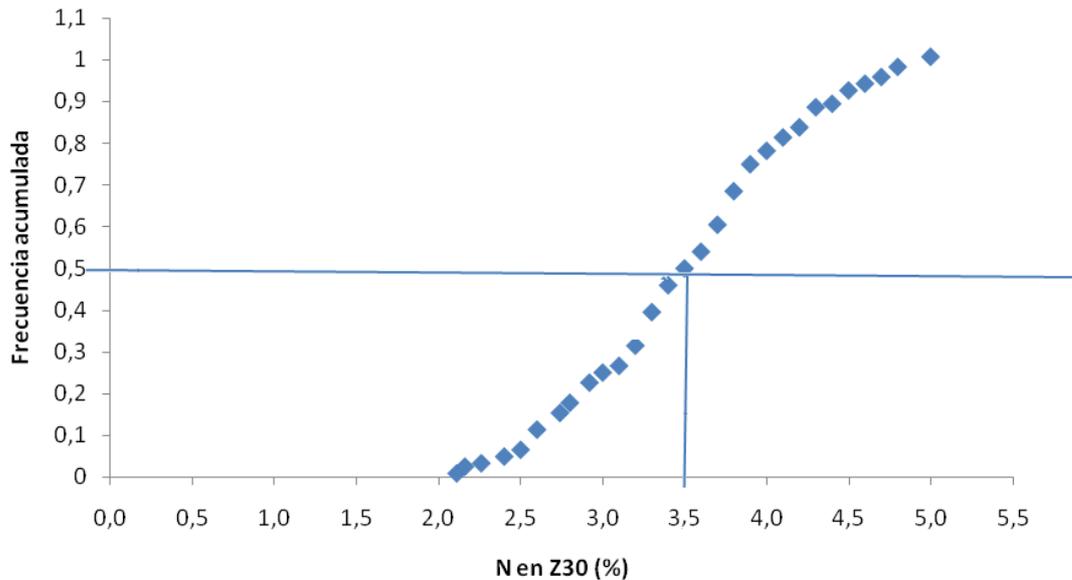
La primera variable de clasificación fue la disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo a la siembra, lo que implica que existió relación entre la disponibilidad en Z 2.2 y la de la siembra. Cuando la disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  en 0-20 cm a la siembra fue mayor a 7 ppm y las lluvias en los 20 días previos a Z 2.2 fueron menores a 33 mm, la disponibilidad media a este estadio fue de  $9 \pm 2$  ppm. En estas condiciones, las relativamente bajas precipitaciones pos-siembra y requerimientos del cultivo, permitirían acumular  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo. A una disponibilidad similar se llegó con valores menores a 7 ppm a la siembra, pero asociado a excesivas precipitaciones en los 40 días pre-siembra (mayores a 209 mm). En este caso, la baja disponibilidad a la siembra sería el resultado de pérdidas de  $\text{N-NO}_3^-$  por exceso hídrico en suelos con alta capacidad de aporte, capaces de acumular  $\text{N-NO}_3^-$  en el período siembra-Z 2.2. En ambos caso la recomendación sería fertilizar con  $30 \text{ kg ha}^{-1}$  de N en promedio (Perdomo et al., 1999).

En situaciones de lluvias superiores a 33 mm en los 20 días previos a Z 2.2 y/o disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  a la siembra menor a 7 ppm aun con lluvias menores a 209 mm en los 40 días previos a la siembra, se llegó a Z 2.2 con una disponibilidad media de 6 a 7 ppm, por lo que la fertilización máxima recomendada sería de  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  de N. En el primer caso se estaría frente a baja disponibilidad por pérdidas pos-siembra y en el segundo, a bajo aporte del suelo posiblemente explicado por suelos de muy baja fertilidad, el antecesor, fecha de siembra, o una combinación de ellos.

Los resultados confirman el efecto negativo de lluvias excesivas sobre la disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  a la siembra y las dificultades para acumular suficiente  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo con un periodo lluvioso en los 20 días previos a Z 2.2. A diferencia de lo planteado en el modelo propuesto para recomendar la fertilización nitrogenada en trigo por Gonzalez Montaner (1991) en que se espera la recuperación del estado hídrico del suelo para decidir la fertilización, en Uruguay las lluvias pos siembras se asocian a pérdidas de  $\text{N-NO}_3^-$  y/o dificultades para acumular  $\text{N-NO}_3^-$  suficiente para cubrir los requerimientos del cultivo.

### 6.5. FERTILIZACIÓN EN Z 3.0.

La fertilización nitrogenada en Z 3.0 se basa en el estado nutricional del cultivo y el rendimiento potencial de la chacra estimado en ese momento. Un 50% de las chacras tuvieron entre 2% y 3,5% de N total en el estadio Z 3.0 (Figura 10).



**Figura 10.** Frecuencia acumulada de chacras en función de la concentración de N total en planta en el estadio Z 3.0.

Esto significa que, según lo propuesto por Baethgen 1992, un 50% de las chacras debieron ser fertilizadas con entre 20 y 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, dependiendo del rendimiento estimado. En tanto un 12 % de las chacras tuvieron más de 4,2% de N en planta, por lo que no requerían fertilización adicional de manera independiente al rendimiento potencial estimado en ese momento.

**Cuadro 5.** Porcentaje de acierto y error en la estimación de rendimiento en el estadio Z 3.0 y rendimiento real obtenido.

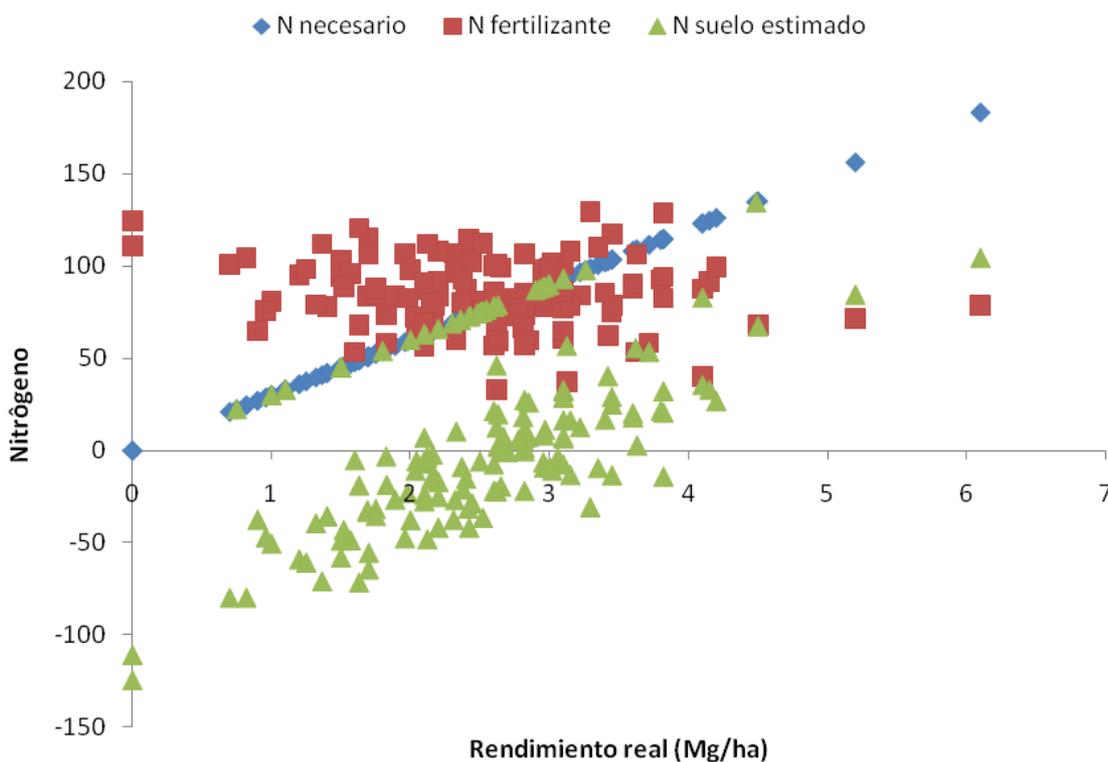
	Estimación correcta del rendimiento		Estimación no correcta del rendimiento		
	Nº	% acierto	<b>Sobreestimaron</b>	<b>Subestimaron</b>	% error
Banda 1 (16 datos)	0	0	16	0	100
Banda 2 (40 datos)	2	5	37	1	95
Banda 3 (53 datos)	17	32	25	11	68
Banda 4 (14 datos)	8	57	0	6	43

En el Cuadro 5 se presenta la relación entre el rendimiento estimado en Z 3.0 y el rendimiento real obtenido. En el 63 % de los casos se sobreestimó el rendimiento en Z 3.0 con relación al efectivamente logrado en chacras cuyo rendimiento final estuvo en el rango definido como Bandas 1 (<1500 kg ha<sup>-1</sup>), 2 (1500 a 2500 kg ha<sup>-1</sup>) y 3 (2500 a 3500 kg ha<sup>-1</sup>). Esto significa que se les aplicó más N del requerido. La subestimación de rendimiento en Z 3.0, lo que implica aplicar menos N del que sería necesario, fue solo del 15%. El porcentaje de aciertos mejoró en los cultivos de alto rendimiento, aunque no superó el 60%.

La sobreestimación puede ser el resultado de un error de apreciación sobre el potencial de producción de una chacra o una estimación correcta que no se concretó por pérdidas en el potencial productivo como consecuencia de factores ambientales desfavorable, problemas sanitarios o de plagas en las etapas posteriores del ciclo del cultivo. La información disponible no permite discriminar entre estas dos posibilidades, pero permite plantear que existe una dificultad en estimar correctamente el potencial de producción de una situación, en especial, cuando éste es bajo. Otra posible interpretación es que, si bien

se muestrea en Z 3.0 para determinar el estado nutricional del cultivo, la dosis a aplicar se define por criterios distintos a los propuestos por Baethgen (1992)

En la Figura 11 se relaciona el rendimiento real obtenido con el aporte de N por fertilizante sumando los tres momentos en los que se fertilizó. La diferencia entre este valor y los requerimientos de N del cultivo para el rendimiento logrado (30 kg de N/1000 kg de trigo, García y Berardo 2006) representa el aporte del suelo cuando es positivo (en el suelo estimado) y fertilización excesiva cuando es negativa.



**Figura 11.** Relación entre rendimiento real, N total agregado como fertilizante (N fertilizante) y N aparente aportado por el suelo (N suelo estimado).  
 $N \text{ necesario} = \text{rendimiento (Mg/ha)} * 30 \text{ kg de N/Mg de grano/ha producido}$   
 $N \text{ suelo estimado} = N \text{ necesario} - N \text{ fertilizante}$

No existió relación entre el rendimiento obtenido y la cantidad total de N agregado como fertilizante (suma de lo agregado en siembra, Z 2.2 y Z 3.0).

Cuando el rendimiento obtenido fue superior a 3000 kg ha<sup>-1</sup> el suelo habría sido responsable de un aporte significativo del N necesario (N suelo estimado mayor a cero).

En tanto, cuando el rendimiento fue menor a 2000 kg ha<sup>-1</sup>, se sobre fertilizó con una media de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N (N suelo estimado menor a cero). Si bien no es posible establecer si el N agregado en exceso quedó como N residual a cosecha o se perdió, en ambos casos implica una pérdida de eficiencia de uso del N agregado al cultivo. Para las condiciones de Argentina, Alvarez (2005) estimó que un 25% del N inicial en situaciones sin fertilización y 35% para lotes fertilizados en Pampa Ondulada quedaría como residual a la cosecha del trigo. Hill et al. (1993) determinaron la existencia de residualidad de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en cultivos fertilizados cuando el rendimiento es bajo.

Por otro lado, como en los rendimientos más altos hubo un aporte importante de N desde el suelo, el rendimiento real pudo estar limitado por N. La sobreestimación del rendimiento realizada en el 63% de los casos implicaría una pérdida de eficiencia de uso del N agregado y riesgos de contaminación ambiental asociados al exceso de N. La subestimación del rendimiento ocurrida en el 14% de los casos totales y en especial en el 43% de las chacras de mayor rendimiento (Banda 4), permite plantear la posibilidad de que se esté sub-fertilizando con N las mejores situaciones. Lo cual concuerda con el (R<sup>2</sup>=0,16) de estimación del rendimiento en base a la disponibilidad de N en lotes de Trigo de la Pampa Ondulada (Alvarez 2007), donde el rendimiento promedio observado y el estimado son muy semejantes, lo cual indica que las estimaciones de mineralización, liberación de N de los residuos, N residual y pérdidas son en promedio aceptables, pero que hay otros factores ambientales que impedirían relaciones estrechas entre suministro

de N al cultivo y rendimiento. Para ambos casos parece necesario mejorar la información y/o el entrenamiento para estimar rendimiento en un estadio tan temprano como Z 3.0.

## 7 CONCLUSIONES

- El manejo de la fertilización nitrogenada realizado en las chacras que conforman la base de datos utilizada si bien considera los criterios propuestos por el modelo desarrollado para decidir la necesidad o no de fertilizar, no se aplica la dosis recomendada.
- Las lluvias ocurridas previas a la siembra, temperatura ambiente y fecha de siembra se asociaron a variaciones en la disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  a la siembra pero no con la disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  en Z 2.2.
- En función de esta información, cuando las lluvias durante los 40 días previos a la siembra son menos de 20 mm y se logran siembras tempranas, es esperable que no haya déficit inicial de N para los cultivos. En siembras inmediatas a períodos de precipitaciones excesivas (135 mm) es esperable muy baja disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$ , por lo que, si no se dispone del valor de análisis, sería necesario corregir con la dosis máxima propuesta. Para las situaciones intermedias, la única herramienta válida sería el análisis de suelo correspondiente.
- En las re-fertilizaciones a Z 3.0 la principal limitante para la correcta recomendación de la dosis de N a agregar sería la estimación del rendimiento potencial de cada situación. La sobre estimación de los rendimientos bajos ( $< 3\text{Mg/ha} = < 3000\text{ kg ha}^{-1}$ ) determinó sobre-fertilización, por lo que se plantea un problema de eficiencia de uso del fertilizante. En los rendimientos superiores ( $\geq 3\text{Mg/ha} = \geq 3000\text{ kg ha}^{-1}$ ) se sub-fertilizó con  $\text{N-NO}_3^-$ , por lo que gran parte del rendimiento esta explicado por el aporte de N del suelo. En estas situaciones el  $\text{N-NO}_3^-$  podría estar actuando como limitante para el logro de rendimientos mayores.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez R (2007). "Fertilización de cultivos de granos y pasturas" (Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía: Buenos Aires).
- Baethgen W (1992). Fertilización nitrogenada de cebada cervecera en el litoral oeste del Uruguay. INIA, La Estanzuela. Serie Técnica nº 24. 59 p.
- Baethgen W, Cardellino G (1979). Movimiento de nitratos bajo diferentes coberturas vegetales – II. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 93 p.
- Barbieri PA, Echeverría HE, Sainz Rozas HR (2009). Dosis óptima económica de N en trigo según el momento de fertilización en el Sudeste Bonaerense. *Informaciones Agronómicas* 42, 11-15.
- Berardo A (1994). Aspectos generales de fertilización y manejo del trigo en el área de influencia de la Estación Experimental INTA-Balcarce. *Boletín Técnico* nº 128.
- Bono A, Álvarez R (2009). Rendimiento de trigo en la región Semiárida y Subhúmeda Pampeana. *Informaciones Agronómicas*: 41, 18- 21.
- Calviño PA, Sadras VO (2002). On farm assesment of constraints to wheat in relation to different previous crops. *Journal Agricole Science Cambridge*. nº 118,157-163.
- Capurro E, Baethgen W, Trujillo A, Bozzano A (1982). Rendimientos y respuesta a NPK de Cebada Cervecera. CIAAB, La Estanzuela. *Miscelanea* nº 43. 21p.
- Cassanova O (1999). "Manual de prácticas". (Facultad de Agronomía: Montevideo)
- Diaz Zorita M (2000). Momento de aplicaciones de urea para aumentar la producción de grano de trigo en el oeste bonaerense. En" Congreso argentino de la Ciencia del Suelo (17º.,2000, Mar del Plata, Bs. As., Argentina)".
- García FO, Berardo A (2006). Trigo. En "Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos". (Eds. H Echeverría, F García) pp. 233-253. (INTA: Buenos Aires).
- González Montaner JH, Maddonni GA, Mailland N, Posborg M (1991). Optimización de la respuesta a la fertilización nitrogenada en el cultivo de trigo a partir de un modelo de decisión para la subregión IV (sudeste de la provincia de Buenos Aires). *Ciencia del Suelo* 9, 41-50.
- Hill Lavista M, Marques Cabezudo A, Puchkariov Fomichov K (1993). Efectos de distintos manejos de cebada y trigo en el desarrollo del cultivo de girasol de segunda. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 115p.
- Hoffman E, Ernst O, Brasetti D, Siri G, Espasandín A (1992). Modificación por manejo de la curva de crecimiento, su influencia sobre rendimiento, componentes y calidad industrial de cebada cervecera. En "Reunión Nacional de Investigadores de Cebada Cervecera (3ª.,1992, Minas, Lavalleja)". Trabajos presentados. pp. 124-133. (Hemisferio Sur: Montevideo).

Hoffman E, Perdomo C, Pastorini M, Pons C (1999). Indicadores de manejo de la fertilización nitrogenada en cebada cervecera. pp. 364-374.

Hoffman E, Ernst O, Perdomo C (1999). Ajuste de la fertilización nitrogenada en trigo en función de indicadores objetivos y su efecto en rendimiento y calidad de grano. En "Jornada sobre Rendimiento y Calidad de Trigo (1a.,1999, Mercedes, Soriano)". Actas. pp. 20-27.( Mesa Nacional de Trigo: Paysandú).

Hoffman E, Perdomo C, Ernst O, Bordoli M, Pastorini M, Pons C, Borghi E (2010). Propuesta para el manejo del N en cultivos de invierno en Uruguay. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. 46, 13-18.

Hoffman E, Perdomo C (2011). Manejo de N en cereales de invierno en un escenario de cambios del sistema agrícola Uruguayo. En "Simposio Nacional de Agricultura (2º., 2011, Paysandú). Trabajos presentados (Ed. A Ribeiro) pp. 45-60. (Hemisferio Sur: Montevideo).

URUGUAY. PODER LEGISLATIVO. 2009. Ley 18564 CONSERVACIÓN, USO Y MANEJO ADECUADO DE LAS AGUAS. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 17 octubre 2012. Disponible en <http://200.40.229.134/Leyes/AccesoTextoLey.asp?Ley=18564&Anchor=>

URUGUAY. MINISTERIO DE GANADERÍA AGRICULTURA Y PESCA .DIRECCIÓN ESTADÍSTICAS AGROPECUARIAS.2010. Anuario Estadísticos. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 15 setiembre 2012. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/portal/hgxpp001.aspx?7,5,63,O,S,0,MNU;E;27;4;MNU;,>

Oudri N, Castro J, Doti R, Secondi A (1976). Guía para fertilización de cultivos. (MAP: Montevideo).

Perdomo C, Hoffman E, Pastorini M, Pons C (1999). Relación entre la concentración de  $\text{NO}_3^-$  del suelo en siembra y Z 2.2 y la respuesta al N en Cebada Cervecera. En "Congreso Latinoamericano de Cebada, Colonia, Uruguay".

Perdomo C, Bordoli M (1999). Ajuste de la fertilización nitrogenada en trigo y su relación con el contenido de proteína del grano. En "Jornada sobre Rendimiento y Calidad de Trigo (1a.,1999, Mercedes, Soriano)". Actas. pp. 42-48.( Mesa Nacional de Trigo: Paysandú).

Reussi Calvo N, Etcheverría HE (2006). Estrategias de fertilización nitrogenada en trigo: Balance hídrico para el sur bonaerense. Ciencia del Suelo 24(2): 115-122.

Studdert, G.A., Echeverría, H.E (2006). Relación entre el cultivo antecesor y la disponibilidad de N para el trigo en la rotación. (en línea). Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Recursos Naturales y Ambiente. Consultado ago. 2010. Disponible en [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1850-20672006000100010](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672006000100010)

URUGUAY. MINISTERIO DE DEFENSA NACIONAL. DIRECCIÓN NACIONAL DE METEOROLOGÍA. 2010. El clima del Uruguay. (en línea). Montevideo. Consultado 13 ago. 2010. Disponible en [http://www.meteorologia.com.uy/caract\\_climat.htm](http://www.meteorologia.com.uy/caract_climat.htm)