

Disponibilidad de nitratos en sistemas agrícolas sin laboreo y su relación con variables ambientales y de manejo

Mazzilli Sebastián R¹, Ernst Oswaldo R¹, Sastre Andrés¹, Terra Gabriel¹

¹ Facultad de Agronomía, Estación Experimental Mario Alberto Cassinoni, Universidad de la República. Ruta 3, km 363, Paysandú 60000, Uruguay. Correo electrónico: smazzilli@fagro.edu.uy

Recibido: 23/7/14 Aceptado: 9/2/15

Resumen

El nitrógeno (N) es el nutriente que con mayor frecuencia limita la producción vegetal. Para decidir la fertilización nitrogenada de trigo y cebada en Uruguay se utilizan dos modelos, uno desarrollado por la Facultad de Agronomía y otro generado para la región pampeana Argentina. Ambos consideran la concentración de nitratos en el suelo al momento de la siembra. Los objetivos del trabajo fueron: i) generar un modelo empírico para estimar la concentración de N-NO_3^- en los primeros 20 cm de perfil, ii) diagnosticar el aporte actual de N en los sistemas de producción y iii) relacionar la concentración de N-NO_3^- en los primeros 20 cm con la concentración de N-NO_3^- en profundidad (20-40 cm). Se utilizaron 274 unidades de manejo de productores CREA que determinaron la concentración de N-NO_3^- previo a la siembra (0-20 y 20-40 cm) entre 2009 y 2012 y tenían registros de precipitaciones y prácticas de manejo. La distribución de los momentos de muestreo fue homogénea entre años (80 % entre mayo y junio). La concentración de N-NO_3^- fue significativamente mayor en el año 2009 (12 mg.kg^{-1}), seguida por la del año 2012 (9 mg.kg^{-1}), en tanto que 2010 y 2011 tuvieron concentraciones menores que no difirieron una de la otra (8 mg.kg^{-1}). Las precipitaciones ocurridas en los 50 días previos al muestreo determinaron la concentración de N-NO_3^- (0-20 cm). Tanto el exceso (≥ 216 mm) como el déficit (< 2 mm) disminuyeron las concentraciones. La relación entre N-NO_3^- en superficie y en profundidad fue significativa ($R^2 = 0,60$; $P < 0,0001$). Sin embargo, la variabilidad inhabilitaría predecir con precisión la concentración en profundidad.

Palabras clave: nitratos, condiciones ambientales, trigo, prácticas de manejo, fertilización

Summary

Nitrate Availability in No-till Agricultural Systems and their Relationship with Environmental and Management Variables

Nitrogen (N) is the nutrient that most frequently limits crop production. In deciding nitrogen fertilization on wheat and barley in Uruguay two models are used, one developed by the School of Agriculture (Universidad de la República) and other developed for the Rolling Pampa in Argentina. Both take into account nitrate concentration at sowing. The objectives of this research were: i) generating an empirical model to estimate N-NO_3^- concentration in the first 20 cm depth, ii) establishing the N contribution in the current production systems, and iii) to relate the N-NO_3^- concentration in the first 20 cm depth with the concentration in the 20-40 cm layer. 274 management units were collected from CREA farmers that determined the N-NO_3^- concentration before sowing (0-20 y 20-40 cm) between 2009 and 2012, and had records of precipitation and management practices. The timing of soil samples distribution were similar between years (80% between May and June). The N-NO_3^- concentration was significantly higher in 2009 (12 mg.kg^{-1}), followed by the year 2012 (9 mg.kg^{-1}), while 2010 and 2011 years had a lower concentration and not different from each other (8 mg.kg^{-1}). Rainfall occurred within the 50 days prior to the sampling determined N-NO_3^- concentration (0-20 cm). Either the excess (≥ 216 mm) as the deficit (< 2 mm) in precipitations decreased the concentrations. The relationship between N-NO_3^- in surface and depth was significant ($R^2 = 0.60$; $P < 0.0001$). However, the variability would not allow to predict N-NO_3^- in depth with precision.

Keywords: nitrate, environmental conditions, wheat, management practices, fertilization

Introducción

El nitrógeno (N) es el nutriente que con mayor frecuencia limita la producción vegetal (Maddonni *et al.*, 2003). Por lo tanto, para concretar buenos rendimientos es imprescindible al menos en los cereales, realizar fertilizaciones nitrogenadas en cada uno de los ciclos productivos (García y Berardo, 2005). La absorción del nitrógeno desde la solución del suelo se da principalmente en forma de iones de amonio (NH_4^+) y nitratos (NO_3^-), pero como en general la disponibilidad de NH_4^+ es relativamente baja en suelos minerales bien drenados (Barker y Bryson, 2007), la mayoría de los sistemas de diagnóstico y recomendación de la fertilización nitrogenada utilizan la concentración de N-NO_3^- como variable predictiva (González Montaner *et al.*, 1997; Calviño *et al.*, 2002; Hoffman *et al.*, 2010). Para el caso de trigo y cebada en Uruguay se utilizan principalmente dos modelos de fertilización, uno desarrollado para las condiciones locales por la Facultad de Agronomía (Hoffman *et al.*, 2010) y otro generado para la región pampeana Argentina y conocido como «nitrógeno objetivo» (Calviño *et al.*, 2002). El modelo local presenta un mayor nivel de complejidad que el modelo de «nitrógeno objetivo» y toma en cuenta tres momentos de muestreo y corrección de la fertilización durante el ciclo del cultivo, siembra, al estadio Zadoks 2.2 (Z 2.2) y al estadio de Zadocks 3.0 (Z3.0) (Zadoks *et al.*, 1974). En los dos primeros momentos (siembra y Z 2.2) la variable predictiva relevada es la concentración de N-NO_3^- en los primeros 20 cm de suelo, mientras que al estadio de Z 3.0 la variable predictiva es la concentración de N en planta. Por su parte el modelo de «nitrógeno objetivo» sólo toma en cuenta un momento de muestreo al momento de la siembra y su variable predictiva es la concentración de N-NO_3^- en suelo hasta los 40 o 60 cm de profundidad.

Es ampliamente conocido que el contenido de NO_3^- del suelo y por lo tanto el indicador de respuesta esperada a la fertilización nitrogenada de los modelos de fertilización de cultivos de invierno en la región, es una variable dependiente de la temperatura, humedad, fertilidad, manejo del suelo, cultivo antecesor, y cuando hay crecimiento vegetal, del estado vegetativo del cultivo (García y Berardo, 2005). Si bien estos factores y sus respuestas son conocidos, no existen en la región modelos cuantitativos simples para predecir al menos, rangos de disponibilidad en un momento dado de forma sencilla.

Para el caso del modelo «nitrógeno objetivo», sí se han desarrollado en la región modelos que predicen la concentración de nitratos en profundidad en función del contenido

en superficie (Álvarez *et al.*, 2001; Bono y Álvarez, 2007). En este sentido, Álvarez *et al.* (2001) encontraron para muestreos de nitratos antes de la siembra de trigo una clara estratificación en profundidad con los mayores niveles en superficie y ajustes relativamente buenos entre la concentración total de N-NO_3^- en superficie con estratos más profundos. En base a esto, se generaron dos ecuaciones generales que relacionan el contenido en el estrato 0-20 con el estrato 0-60 cm, lo que según los autores podría evitar el muestreo en profundidad. Por su parte Bono y Álvarez (2007) no encontraron diferencias en las pendientes de la relación entre el contenido de N-NO_3^- de 0-20 cm y el contenido de N-NO_3^- en el estrato 0-60 cm para distintos sistemas de laboreo, cultivos antecesores y tipos de suelos, y los modelos lograron explicar entre un 66 y 79 % de la variación.

Los sistemas actuales de agricultura con alta predominancia del cultivo de soja han reducido la variabilidad de cultivos antecesores (DIEA, 2013), por lo que esta variable posiblemente haya perdido relevancia como determinante de la concentración de N-NO_3^- a la siembra. No obstante, la alta predominancia de soja en el sistema afecta el balance de N del suelo, ya que la extracción como grano con la cosecha produce balances negativos de N en un cultivo que no recibe fertilización nitrogenada (Salvagiotti *et al.*, 2008; Di Ciocco *et al.*, 2011). Si bien estos balances han sido cuestionados para la región pampeana argentina y es posible que en muchos casos sean neutros o quizás positivos (Álvarez *et al.*, 2014) existen reportes que indican que el contenido de nitrógeno total en suelo (Ernst y Siri-Prieto, 2009) y el potencial de mineralización de nitrógeno como indicador de aporte de N del suelo disminuyen consistentemente en sistemas de agricultura continua (Cozzoli *et al.*, 2010), lo cual se reflejaría en mayor frecuencia de situaciones con necesidades de corregir el aporte de N al cultivo con fertilización nitrogenada.

Los objetivos de este trabajo son: i) generar un modelo empírico para estimar la concentración de N-NO_3^- en los primeros 20 cm del perfil a la siembra de trigo y cebada a partir de las precipitaciones previas, las prácticas de manejo asociadas y las características del suelo; ii) diagnosticar el aporte actual de N en los sistemas de producción; iii) relacionar la concentración de N-NO_3^- en los primeros 20 cm de suelo con la concentración de N-NO_3^- en el horizonte 20-40 cm. Para esto se utilizaron bases de datos de productores que muestrearon y determinaron la concentración de N-NO_3^- previo a la siembra en los horizontes 0-20 y 20-40 cm entre el año 2009 y 2012 y tenían registros de

precipitaciones y de las prácticas de manejo previas a la siembra. Contar con esta información es relevante para algunos de los modelos de fertilización utilizados y permitiría mejorar el conocimiento de la dinámica de nitratos en las condiciones actuales de producción agrícola.

Materiales y métodos

Base de datos utilizada y análisis asociados

Para este trabajo fueron utilizados datos provenientes de empresas agropecuarias asociadas al grupo CREA «La Cuchilla» (Uruguay). Los grupos CREA (Consortios Regionales de Experimentación Agropecuaria) son grupos de empresas agropecuarias interesadas en analizar y discutir aspectos relacionados a la agronomía y el agronegocio en su conjunto. Para este trabajo se obtuvo información de un total de 274 unidades de manejo entre el año 2009 y 2012. Cada unidad de manejo debía tener para ingresar a la base de datos: muestreo de N-NO_3^- a dos profundidades (0-20 y 20-40 cm), registros de precipitaciones diarias en el predio donde se encontraba la unidad de manejo o en algún predio cercano (a menos de 15 km), información completa de manejo de la unidad previo al muestreo, e información de suelos en cada unidad de manejo.

Todos los registros fueron de sistemas agrícolas en siembra directa. De cada unidad de manejo se colectó la siguiente información: nombre del productor, zona agroclimática (Litoral Norte, Litoral Sur y Centro), suelo según Unidad CONEAT¹ (Durán, 1987), cultivo antecesor, fecha de inicio del período de barbecho, fecha de muestreo de suelos para N-NO_3^- ; concentración de N-NO_3^- (mg.kg^{-1} de suelo) en los primeros 20 cm del perfil de suelo, concentración de N-NO_3^- (mg.kg^{-1} de suelo) en el horizonte 20-40 cm, materia orgánica (%) y precipitaciones diarias. Con la información disponible fue posible estimar el tiempo de barbecho (días entre el inicio del barbecho y el muestreo del suelo) y las precipitaciones acumuladas en los 10, 20, 30, 40 y 50 días previos al muestreo. Como las muestras fueron tomadas por los técnicos de las empresas y analizadas en laboratorios privados diversos, parte de la variabilidad podría estar explicada por diferencias en las metodologías de muestreo y calibración de los análisis. No obstante, por

¹Los grupos CONEAT no son estrictamente unidades cartográficas básicas de suelo, sino que constituyen áreas homogéneas, definidas por su capacidad productiva en términos de carne bovina, ovina y lana en pie. Dichos grupos se caracterizaron mediante fotointerpretación a escala 1:40.000, verificaciones de campo y análisis físico-químicos de los suelos.

la cantidad de información disponible es una buena representación de la realidad y las condiciones en las cuales asesores técnicos y productores toman decisiones.

Distribuciones de frecuencia acumuladas

Se ordenaron en orden creciente los datos de fecha de muestreo (como día juliano) y las concentraciones de N-NO_3^- en los primeros 20 cm de perfil para cada uno de los años considerados (2009 al 2012). La normalidad de cada conjunto de datos para cada año fue evaluada a partir de la prueba Shapiro-Wilk modificada (Rahman y Govindarajulu, 1997) utilizando el software Infostat 2011/p. Como los resultados de estas pruebas indicaron que ninguna de las poblaciones presenta distribución normal, se utilizó la prueba de Wilcoxon (Mann-Whitney U) para evaluar diferencias en la fecha de muestreo entre años, mientras que para la concentración de N-NO_3^- en los primeros 20 cm de perfil se realizó un análisis de varianza de un muestreo de 10000 aleatorizaciones utilizando el método Bootstrap (Pillar, 2006). A partir de esto se confeccionó una matriz en la que se presentan las poblaciones que se consideran iguales o diferentes para cada conjunto de datos.

Árboles de clasificación y regresión

Los árboles de clasificación y regresión son una aproximación de modelación no paramétrica que explica la respuesta de una variable dependiente a un conjunto de variables independientes continuas, ordinales o categóricas. Estos modelos, realizan una partición recursiva de los datos para encontrar sub-conjuntos de datos más homogéneos en función de criterios de división impuestos por las variables independientes usando algoritmos que minimizan la varianza dentro de cada sub-grupo formado. Los datos dependientes se dividen en una serie de nodos secundarios descendente izquierdo y derecho derivadas de los nodos primarios (Breiman *et al.*, 1984). Tanto el método como su aplicabilidad en investigación agropecuaria es descrito en detalle por Tittonell *et al.* (2008). Para este trabajo se utilizó el software JMP® 8.0 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA), considerando como variable de respuesta o dependiente a la concentración de N-NO_3^- en los primeros 20 cm de suelo. Se consideraron tres variables independientes nominales (zona agroclimática, Unidad CONEAT y cultivo antecesor), una variable ordinal (año de muestreo) y ocho variables continuas (tiempo de barbecho, precipitaciones en los 10, 20, 30, 40 y 50 días previos al muestreo, día de muestreo (juliano) y porcentaje de materia orgánica).

Regresiones lineales

Para analizar la relación entre la concentración de $N-NO_3^-$ en el horizonte de 0-20 cm con el horizonte de 20-40 cm se realizaron regresiones lineales simples y su significancia se estudió realizando un análisis de varianza de la regresión. Para explicar la concentración de $N-NO_3^-$ en el horizonte 20-40 cm en función de la concentración en el horizonte 0-20 cm se ajustaron distintos modelos lineales incorporando además otras posibles variables continuas explicativas como las precipitaciones en los 10, 20, 30, 40 y 50 días previos al muestreo, día de muestreo (juliano) y porcentaje de materia orgánica. Todos los análisis fueron realizados con el software Infostat 2011/p y para el ajuste de los posibles modelos se maximizó el R^2 ajustado.

Resultados

Caracterización de la base de datos

Los registros utilizados estuvieron distribuidos en cantidades iguales en el litoral norte y litoral sur, representados por chacras ubicadas en la zona Young-Guichón (departamentos de Río Negro y Paysandú) y en el departamento de Soriano respectivamente (58 % del total de registros). El 42 % de los registros restantes se ubicaron en la zona centro, que en esta base está representada principalmente por unidades productivas ubicadas en el departamento de Durazno. Además, la base presenta una distribución ho-

mogénea de datos entre años, siendo el 2009 el que tiene menor cantidad de registros (19 %). Como cultivo antecesor al de invierno predomina soja de primera, siendo muy baja la proporción de otros cultivos (Cuadro 1).

La distribución de fechas de muestreo no puede considerarse con una distribución normal en ninguno de los años evaluados ($P < 0,0001$ para los años 2009, 2010 y 2011 y

Cuadro 1. Distribución de registros en la base de datos analizada según zona, año de muestreo y antecesor de verano.

Variable	Detalle	%
Zona	Centro	42
	Litoral Norte	29
	Litoral Sur	29
Año	2009	19
	2010	25
	2011	29
	2012	27
Antecesor	Soja 1 ^{era}	90
	Soja 2 ^{da}	5
	Barbecho químico	3
	Maíz	2
	Sorgo silo	1

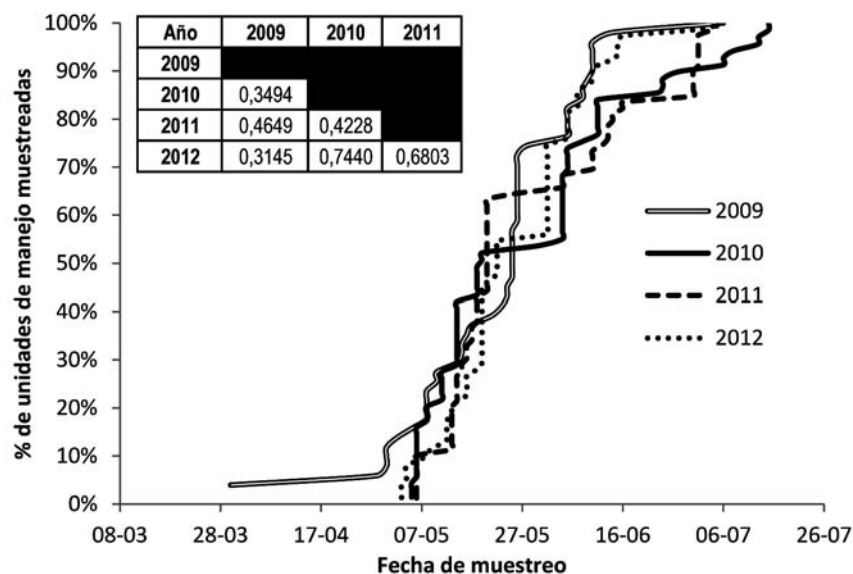


Figura 1. Distribución de fechas de muestreo del suelo según zafra, para 274 situaciones de producción entre 2009 y 2012. Los valores en el cuadro son la probabilidad de que sea significativa la diferencia entre las distribuciones de años apareados.

$P < 0,0133$ para el año 2012). El análisis no paramétrico utilizado indica que la distribución de los muestreos fue relativamente homogénea entre años y cerca del 80 % de las muestras se concentraron entre inicio del mes de mayo y mediados del mes de junio de cada año evaluado (Figura 1).

La concentración de $N-NO_3^-$ y su distribución fue significativamente mayor en el año 2009 que en los demás, con una media de 12 mg.kg^{-1} de $N-NO_3^-$; seguido por el año 2012 con una media de 9 mg.kg^{-1} . En tanto, los años 2010 y 2011 tuvieron una concentración no diferente entre sí ($P \leq 0,05$) de 8 mg.kg^{-1} (Figura 2).

Determinantes de los contenidos de nitratos en superficie

Como se indicó anteriormente, el año 2009 presentó una distribución de datos diferente al resto de los años evaluados. Esta diferencia también fue capturada en el árbol de clasificación y regresión generado, el cual tuvo como primer variable de separación el año de muestreo, siendo el 2009 diferente al resto con concentraciones mayores de $N-NO_3^-$. Dentro del año 2009, el modelo separa un grupo de unidades productivas con mayores concentraciones asociados a la Unidad CONEAT 8.7. Estos datos se corresponden con un campo en particular (datos no presentados), por lo que más que la Unidad CONEAT, el grupo de datos puede estar indicando un manejo o historia diferente de ese campo que no está representado dentro de las variables consideradas para el análisis (Figura 3).

En el nodo del resto de los años (2010, 2011 y 2012) existió una clara separación de situaciones en función de las precipitaciones acumuladas ocurridas en los 50 días previos al muestreo. Cuando las lluvias fueron menores a los 216 mm, para el conjunto de datos analizados, la concentración media de $N-NO_3^-$ paso de 6 a 9 mg.kg^{-1} . El nodo de mayor disponibilidad de $N-NO_3^-$ (precipitaciones $< 216 \text{ mm}$ 50 días previo al muestreo) se vuelve a separar en dos grupos de acuerdo a las precipitaciones acumuladas, en este caso 20 días previos al muestreo. La separación funciona en sentido contrario al anterior, es decir que la concentración de $N-NO_3^-$ aumenta con las precipitaciones. La diferencia ocurre en un rango de precipitaciones acumuladas muy diferentes (2 mm 20 días pre-muestreo y 216 mm 50 días pre-muestreo para este nodo y el anterior respectivamente). Por último, si bien las precipitaciones previas vuelven a estar presentes en la separación de distintas concentraciones de nitratos, también en algunas situaciones el contenido de materia orgánica provoca modificaciones, pero en el conjunto de datos evaluados participan con un poder discriminante mucho más bajo que las precipitaciones pre-muestreo.

Relación entre el contenido de nitratos en superficie y en profundidad

La relación entre la concentración de $N-NO_3^-$ en superficie (0-20 cm) y en profundidad (20-40 cm) fue significativa ($P < 0,0001$) y presenta una asociación positiva entre las

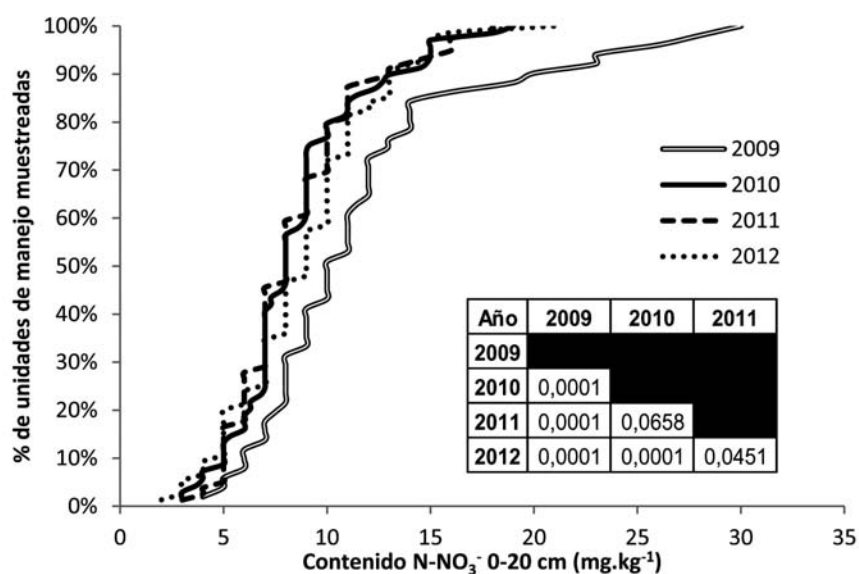


Figura 2. Distribución del contenido de $N-NO_3^-$ en los primeros 20 cm de suelo según año de evaluación. Los valores en el cuadro son la probabilidad de que sea significativa la diferencia entre las distribuciones de años apareados.

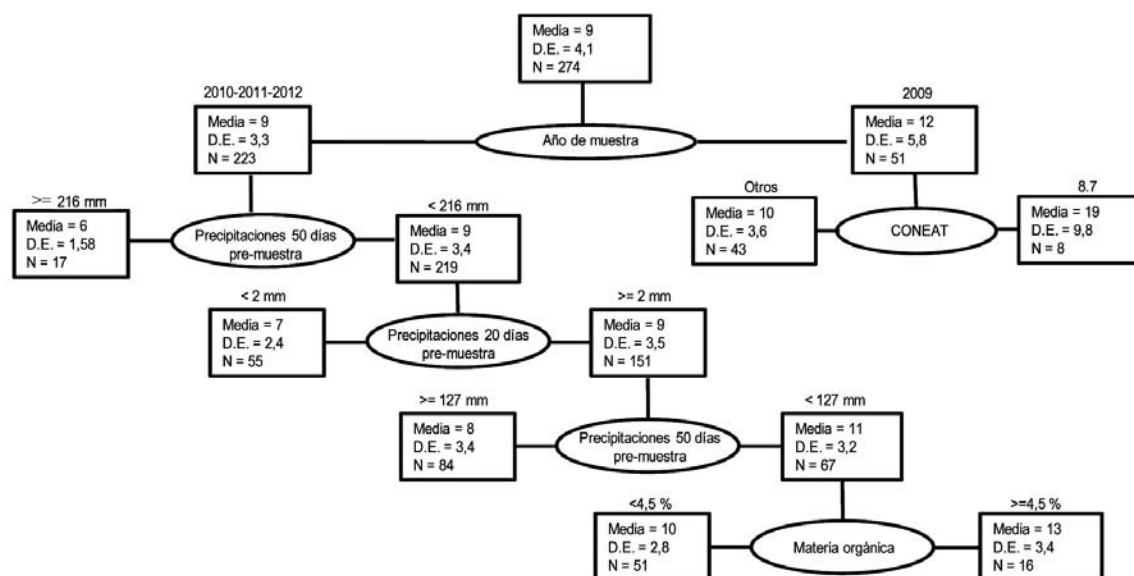


Figura 3. Árbol de clasificación y regresión que explica cambios en la concentración de N-NO_3 en los primeros 20 cm de suelo. Las variables discriminantes aparecen en los óvalos y los grupos discriminados en los rectángulos. Las medias refieren al contenido de nitratos en mg.kg^{-1} de suelo; D.E. es el desvío estándar de ese grupo de datos; y N es el número de situaciones en ese grupo.

variables ($R^2 = 0,60$). No obstante, para cada nivel de N-NO_3 en superficie hay una importante variabilidad en la concentración de N-NO_3 en profundidad, lo que inhabilitaría la utilidad de la regresión para predecir con adecuada precisión la concentración de N-NO_3 en la capa de 20-40 cm a partir del contenido en la capa de 0-20 cm (Figura 4).

Estos niveles de asociación, si bien tuvieron modificaciones entre años de muestreo, presentaron patrones de asociación similares y los mismos problemas para la adecuada predicción que el modelo general (datos no presentados). A su vez, incorporando variables como las precipitaciones previas al muestreo, el contenido de materia orgánica y la fecha del muestreo, no fue posible identificar ningún modelo que mejorara la predicción de la concentración de N-NO_3 en el horizonte 20-40 cm a partir de la concentración en superficie (0-20 cm). Por tanto, bajo las condiciones de campo en las que se obtuvo esta información, no es posible realizar una adecuada predicción de la concentración de N-NO_3 en profundidad (20-40 cm) a partir de los datos en superficie (0-20 cm).

Discusión

Las precipitaciones previas al muestreo generan mayores posibilidades de pérdidas del N disponible en suelo por los procesos de lixiviación y denitrificación (Magdoff, 1991;

Cabrera, 2007). La rama izquierda del árbol de clasificación y regresión (años 2010 al 2012) describe este escenario (Figura 3), ya que más de 216 mm de lluvia acumulada en los 50 días previos al muestreo determinaron que la concentración media de N-NO_3 fuera de 6 mg.kg^{-1} con mínima variabilidad. Esta concentración de N-NO_3 asegura la necesidad de fertilización nitrogenada con la máxima cantidad recomendada con cualquiera de los dos modelos utilizados sin necesidad de realizar un muestreo de suelos, ya que la variable precipitaciones 50 días pre-siembra por sí sola modula la disponibilidad de N-NO_3 en suelo. En términos medios para este grupo de datos el contenido de N-NO_3 se redujo en 1 mg.kg^{-1} cada 70 mm que se precipitaron durante los 50 días previos al muestreo del suelo. Cuando las lluvias acumuladas fueron menores al valor crítico de 216 mm en los 50 días previos al muestreo, la concentración de N-NO_3 presentó una variabilidad dentro de cada nodo, y por tanto, en esa condición, se justificaría el muestreo de suelos para definir la dosis a aplicar en función de la disponibilidad del nutriente. No obstante, la concentración de N-NO_3 se mantuvo relativamente baja en el año 2009, en el que se registraron menores precipitaciones durante el período de barbecho, posiblemente como consecuencia de limitaciones en la mineralización (Barker y Bryson 2007). Si bien puede existir un sesgo por la menor cantidad de situaciones muestreadas (19 % para el 2009 vs ≈ 27 %

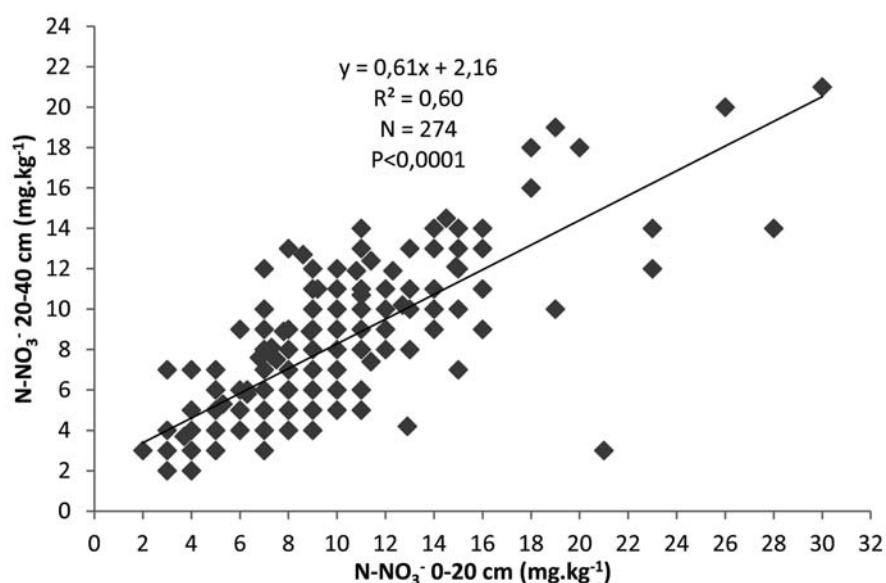


Figura 4. Relación entre la concentración de N-NO_3^- en los primeros 20 cm de suelo y la concentración de N-NO_3^- en el horizonte 20-40 cm.

para el resto de los años), la media de precipitaciones acumuladas durante los 50 días previos al muestreo de suelos fue de 63 ± 5 mm (media \pm error estándar) contra 81 ± 6 mm para el 2012, 109 ± 5 mm para el 2010 y 161 ± 5 mm para el 2011.

Los resultados también sugieren que si bien el exceso de precipitaciones disminuye la disponibilidad de N-NO_3^- , seguramente asociado a los mecanismos de pérdida de N del perfil (lixiviación o desnitrificación), la ausencia de lluvias, al menos en los 20 días previos al muestreo, también se relacionó con baja concentración de N-NO_3^- en el suelo. En estos casos, posiblemente la ausencia de condiciones favorables para la mineralización (Barker y Bryson 2007) sea el proceso que explique este comportamiento. Otro aspecto interesante de este análisis es que, a diferencia de resultados reportados en los que el efecto cultivo antecesor es muy relevante porque influye directa o indirectamente en la dinámica del N (Creus *et al.*, 1998; Calviño *et al.*, 2002; Ernst *et al.*, 2002), en este estudio el cultivo antecesor no aparece como variable relevante. La discrepancia en los resultados, posiblemente sea consecuencia de la alta proporción de soja como cultivo antecesor, lo que generara una relativa homogeneidad en esta variable que, por tanto, pierde importancia en la realidad actual.

En cuanto al aporte de N que está realizando el suelo en el actual sistema de producción al momento de la siembra de los cultivos de invierno, lo primero que surge para la

discusión son los bajos valores promedio de N-NO_3^- cuantificados. Los máximos valores promedio registrados para el año 2009 (nodo principal derecho, Figura 3) estuvieron en el orden de los 19 mg.kg^{-1} de N-NO_3^- ; mientras que para el resto de los años (nodo principal izquierdo, Figura 3) los máximos valores (13 mg.kg^{-1} de N-NO_3^-) estuvieron asociados a lluvias acumuladas durante los 50 días previos al muestreo menores a 127 mm y el suelo con un contenido mayor a 4,5 % de materia orgánica. Si bien no sabemos si el conjunto de datos representa a todas las condiciones existentes a nivel productivo, tienen una adecuada dispersión geográfica y temporal. Si se tiene en cuenta el modelo propuesto para trigo y cebada en Uruguay por Hoffman *et al.* (2010), el cual asume como situaciones de respuesta a la fertilización concentraciones de N-NO_3^- a siembra por debajo de las $16\text{-}18 \text{ mg.kg}^{-1}$ en los primeros 20 cm del perfil, la mayoría de las situaciones del estudio estarían en condiciones de obtener respuesta a la fertilización nitrogenada a la siembra. En promedio sólo un 3 % para el periodo 2010-2012 y 14 % para el año 2009 de las situaciones superaron el valor crítico propuesto de 16 mg.kg^{-1} de N-NO_3^- . En tanto, de acuerdo a los datos de Hoffman *et al.* (2010) entre un 40 y 50 % de los datos utilizados para generar el modelo de fertilización de trigo y cebada en Uruguay habían presentado concentraciones de N-NO_3^- mayores a los 16 mg.kg^{-1} . Esta diferencia seguramente esté explicada por la reducción de la superficie agrícola en

rotación de cultivos con pasturas plurianuales con inclusión de leguminosas (García-Préchac *et al.*, 2004), y el aumento de la participación del cultivo de soja en el sistema (95 % entre soja de primera y segunda en esta base de datos), sistema que genera disminuciones en el contenido total de nitrógeno en suelo y disminuciones del potencial de mineralización neta (Ernst y Siri-Prieto, 2009; Cozzoli *et al.*, 2010).

A diferencia de los trabajos regionales (Álvarez *et al.*, 2001; Bono y Álvarez, 2007), si bien se cuantificó una relación significativa entre la concentración de N-NO₃⁻ en superficie y en profundidad (R² = 0,60), el ajuste de la ecuación no permite estimar de forma adecuada la concentración de N-NO₃⁻ en función de los contenidos en superficie. El resultado limita la posibilidad de utilizar el modelo propuesto por González Montaner *et al.* (1997) sin tomar la muestra en profundidad. La diferencia entre los distintos ajustes puede estar dada por el hecho que los datos utilizados por los autores anteriormente mencionados, fueron todos obtenidos de experimentos, mientras que los datos con los que se trabajó en este estudio provienen de una base de datos de situaciones reales de producción, de distintas personas muestreando, distintos laboratorios y sin un fin de investigación.

Conclusiones

Los resultados del trabajo son concluyentes respecto a que el régimen de precipitaciones previo al momento de muestreo es una variable que puede utilizarse para predecir la concentración de N-NO₃⁻ en los primeros 20 cm del suelo a la siembra de cultivos de invierno. Elevadas precipitaciones 50 días previos al muestreo disminuyen de forma marcada la concentración de N-NO₃⁻ por lo que no se justifica muestrear el suelo para definir la dosis de fertilizante nitrogenado a la siembra. A su vez, muy escasas precipitaciones 20 días previas al muestreo limitan la mineralización y por ende la concentración de N-NO₃⁻ medido en la muestra. Por otra parte, los resultados muestran el escaso aporte de N que está ocurriendo en el actual sistema de producción, con muy baja proporción de situaciones en las que no es necesaria la fertilización nitrogenada en cultivos de invierno. Esto es una clara diferencia del sistema de producción agrícola actualmente existente en Uruguay con el dominante cuando se generó el modelo para decidir la fertilización nitrogenada para trigo y cebada. Por último, no se encontró una adecuada asociación entre la concentración de N-NO₃⁻ en la primera capa de suelo (0-20 cm) con la concentración en profundidad (20-40 cm), lo que determina que si se quiere estimar la concentración de N-NO₃⁻ en esa

capa de suelo la mejor alternativa es seguir obteniendo la muestra a campo de la mejor manera posible.

Agradecimientos

Los datos fueron inicialmente colectados como parte del trabajo de tesis de grado de Gabriel Terra y Andrés Sastre. Agradecemos al grupo CREA «La Cuchilla» por la información y a los técnicos que trabajan en cada una de las empresas que año a año tomaron las muestras de suelo. Especialmente queremos agradecer a Alexander Alt de Tierra Greda Uruguay, Juan Agostinelli de Kilafen y Federico Frick de Adecoagro que proporcionaron la mayor parte de la información de manejo y precipitaciones. A su vez agradecemos a Mónica Cadenazzi por el apoyo en el análisis estadístico de los datos.

Bibliografía

- Álvarez R, Steinbach HS, De Paepe JL. 2014. A regional audit of nitrogen fluxes in pampean agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 184: 1-8.
- Álvarez CR, Álvarez R, Steinbach HS. 2001. Predictions of available nitrogen content in soil profile depth using available nitrogen concentration in surface layer. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32: 759-769.
- Barker AV, Bryson GM. 2007. Nitrogen. En: Barker AV, Pilbeam DJ. [Eds]. *Handbook of plant nutrition*. Boca Raton: CRC Press. pp. 21-50.
- Bono A, Álvarez R. 2007. Estimación de nitratos en profundidad en suelos de la región semiárida y subhúmeda pampeana. *Informaciones Agronómicas*, 33: 25-26.
- Breiman L, Friedman JH, Olshen RA, Stone CJ. 1984. *CART: Classification and regression trees*. New York: Chapman and Hall. 254p.
- Cabrera ML. 2007. Mineralización y Nitrificación: Procesos Claves en el Ciclo del Nitrógeno. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 34: 1-9.
- Calviño P, Echeverría HE, Redolatti M. 2002. Diagnóstico de nitrógeno en trigo con antecesor soja bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*, 20: 36-42.
- Cozzoli MV, Fioriti N, Studdert GA, Domínguez GF, Eiza MJ. 2010. Nitrógeno liberado por incubación anaeróbica y fracciones de carbono en macro- y microagregados bajo distintos sistemas de cultivo. *Ciencia del Suelo*, 28: 155-167.
- Creus CR, Studdert GA, Echeverría HE, Sánchez SR. 1998. Descomposición de residuos de cosecha de maíz y dinámica del nitrógeno en el suelo. *Ciencia del Suelo*, 16: 51-57.
- Di Ciocco C, Penón E, Coviella C, López S, Díaz-Zorita M, Momo F, Álvarez R. 2011. Nitrogen fixation by soybean in the Pampas: Relationship between yield and soil nitrogen balance. *Agrochimica*, 55: 305-313.
- DIEA. 2013. Producción vegetal: Cultivos cerealeros e industriales [En Línea]. En: Anuario estadístico agropecuario 2013. Montevideo: MGAP. pp. 84-99. Consultado 4 marzo 2015. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,diea,diea-anuario-2013,0,es,0>.
- Durán A. 1987. La cartografía de suelos CONEAT y sus posibilidades de utilización. Montevideo: Facultad de Agronomía. 17p.
- Ernst O, Siri-Prieto G. 2009. Impact of perennial pasture and tillage systems on carbon input and soil quality indicators. *Soil and Tillage Research*, 105: 260-268.

- Ernst O, Bentancur O, Borges R.** 2002. Descomposición de rastrojo de cultivos en siembra sin laboreo : trigo, maíz, soja y trigo después de maíz o de soja. *Agrociencia*, 6: 20 - 26.
- García FO, Berardo A.** 2005. Trigo. En: Echeverría HE, García FO. [Eds.]. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Balcarce : INTA, pp 233 - 253.
- García-Prechac F, Ernst O, Siri-Prieto G, Terra JA.** 2004. Integrating no-till into crop-pasture rotations in Uruguay. *Soil and Tillage Research*, 77: 1 - 13.
- González Montaner JH, Maddonni GA, Dinapoli MR.** 1997. Modeling grain yield and grain yield response to nitrogen in spring wheat crops in the Argentinean Southern Pampa. *Field Crops Research*, 51: 241 - 252.
- Hoffman E, Perdomo C, Ernst O, Bordoli M, Pastorini M, Pons C, Borghi E.** 2010. Propuesta para el manejo del nitrógeno en cultivos de invierno en Uruguay. *Informaciones Agronómicas*, 46: 13 - 18.
- Maddonni GA, Vilarriño P, García de Salamone I.** 2003. Dinámica de los nutrientes en el sistema suelo-planta. En: Pascale AJ. [Ed.]. Producción de Granos : Bases funcionales para su manejo. Buenos Aires : Facultad de Agronomía. pp. 441 - 477.
- Magdoff F.** 1991. Understanding the Magdoff pre-sidedress nitrate test for corn. *Journal of Production Agriculture*, 4: 297 - 305.
- Pillar VD.** 2006. MULTIV : Multivariate Exploratory Analysis, Randomization Testing and Bootstrap Resampling, User's Guide version 2.4 [En línea]. Porto Alegre : Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Consultado 18 febrero 2015. Disponible en: <http://ecoqua.ecologia.ufrgs.br/arquivos/Software/Multiv/MultivManual.pdf>
- Rahman MM, Govindarajulu Z.** 1997. A modification of the test of Shapiro and Wilk for normality. *Journal of Applied Statistics*, 24: 219 - 236.
- Salvagiotti F, Cassman KG, Specht JE, Walters DT, Weiss A, Dobermann, A.** 2008. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans : A review. *Field Crops Research*, 108: 1-13.
- Tittonell P, Shepherd KD, Vanlauwe B, Giller KE.** 2008. Unravelling the effects of soil and crop management on maize productivity in smallholder agricultural systems of western Kenya : An application of classification and regression tree analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 123: 137 - 150.
- Zadoks JC, Chang TT, Konzak CF.** 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14: 415 - 421.