

Indicadores de mineralización de nitrógeno en el sudoeste bonaerense: relación con las fracciones orgánicas del suelo

Nitrogen mineralization indicators in the southwest of the argentinean pampas: relationship with soil organic fractions

MARTINEZ, Juan M.; GALANTINI, Juan A.; DUVAL, Matías E.; LÓPEZ, Fernando M.

jmmartinez@criba.edu.ar

Resumen

En la actualidad, no existen estudios que establezcan las relaciones de los indicadores rápidos de mineralización de nitrógeno (N)-como el N incubado en anaerobiosis (Nan) y el N hidrolizable (Nhid)-con las fracciones orgánicas en suelos con aportes variables de materia orgánica particulada (MOP). El objetivo de este estudio fue evaluar al Nan y Nhid, y la relación con las fracciones orgánicas de carbono (C) y N del suelo, lábiles y recalcitantes, en suelos del sudoeste bonaerense (SOB). Durante 2010 y 2011, se muestrearon 78 lotes bajo siembra directa en 0-20 cm. Se cuantificó Nhid y Nan, y se evaluó: carbono orgánico total (COT), particulado (COP) y asociado a la fracción mineral (COM); N orgánico total (Nt), particulado (NOP), y asociado a la fracción mineral (NOM), carbohidratos totales (CHt) y solubles (CHs). Los suelos se agruparon en 2 grupos por el análisis de clúster de acuerdo a las fracciones orgánicas y al contenido de limo+arcilla: A y B. Los valores de Nhid y Nan fueron de 6,5-50,4 mg kg⁻¹ y 10,7-81,9 mg kg⁻¹, respectivamente. Se hallaron asociaciones significativas entre Nan y Nhid con las fracciones orgánicas evaluadas que difirieron según el grupo de suelo considerado. Las relaciones entre Nan y Nhid con los diferentes pools de C y N, lábiles o recalcitantes, son dependientes de la protección física producida por el limo+arcilla. El análisis de clúster permitió lograr este agrupamiento en base a varias fracciones orgánicas y debería ser usado para comparar suelos con condiciones similares.

Palabras claves: Regiones semiárida y subhúmeda- Fracciones lábiles- Nitrógeno potencialmente mineralizable

Introducción

El nitrógeno (N) es el nutriente más limitante para la producción de cultivos en las zonas agrícolas (Fageria & Baligar, 2005), especialmente en los cultivos de cereales (Zebarth *et al.*, 2009, St. Luce *et al.*, 2011). Por esta razón, es de gran importancia conocer como es su dinámica, para lograr incrementar su eficiencia de uso en los sistemas productivos. En las regiones, semiáridas y subhúmedas es necesario hacer un diagnóstico correcto de la fertilización ya que los rendimientos son más bajos, por lo que la relación costo-beneficio puede ser alta, lo que lleva a problemas económicos y ambientales (Mulvaney *et al.*, 2001). Para mejorar el diagnóstico de la fertilidad nitrogenada, el conocimiento del N que se mineralizará de la materia orgánica (MO) podría ser fundamental para ajustar la dosis de N a aplicar (St. Luce *et al.*, 2011).

La mayoría de las estimaciones de la contribución de N por mineralización del suelo se basan en las incubaciones aeróbicas durante largos períodos (Stanford & Smith, 1972). Esta metodología permite determinar la fracción del N del suelo que es susceptible de ser transformada en formas minerales, también denominada N potencialmente mineralizable (Npm). El Npm es la fracción del N

Summary

Currently, there are no studies that establish the relationship between nitrogen (N) mineralization indicators –such as anaerobic N (Nan) and hydrolyzable N (Nhid) – and the soil organic fractions of soils with highly variable supplies of particulate organic matter (MOP). The aim of this study was to evaluate Nan and Nhid, and their relationship with soil organic carbon (C) and N fractions, both labile and recalcitrant, in several soils in the southwest of Buenos Aires province (SOB). In 2010 and 2011, 78 farmer fields under no-tillage were sampled at 0-20 cm. The Nhid and Nan were quantified and total organic carbon (COT), particulate organic (COP), mineral organic COM, soil organic (Nt), particulate organic (NOP), mineral organic (NOM), and total (CHt) and soluble carbohydrates were evaluated. The soils were divided into 2 groups according to soil organic fractions and silt+clay using cluster analysis: Group A and B values were 6.5- 50.4 mg kg⁻¹ and 10.7- 81.9 mg kg⁻¹ for Groups A and B respectively. Nan and Nhid were significantly correlated with the soil organic fractions evaluated, which differed by soil group. The relationships between Nan and Nhid and the different labile and recalcitrant C and N pools are dependent on the physical protection provided by the silt + clay. The cluster analysis allowed grouping soils based on soil organic fractions and should be used to compare soils with similar conditions.

Key words: Semiarid and subhumid regions- Labile fractions- Potentially mineralizable nitrogen

orgánico considerada como una estimación estandarizada de la mineralización potencial del suelo. Sin embargo, esta metodología demanda tiempo de procesamiento (Walley *et al.*, 2002) por lo que la investigación se ha centrado en el desarrollo de diferentes métodos biológicos y químicos, rápidos y sencillos para la determinación del Npm (Bundy & Meisinger, 1994; Echeverría *et al.*, 1994; Griffin, 2008). Entre los métodos químicos, podemos citar al obtenido mediante una extracción química con soluciones salinas débiles (Keeney & Bremner, 1966), y soluciones más fuertes (Gianello & Bremner, 1986). Estos métodos se basan en la hipótesis que un extractante específico libera N de diferentes fracciones con descomposición similar, aunque no sean químicamente homogéneas. Los extractantes químicos no pueden emular la acción de los microorganismos, ni logran incluir factores ambientales. Dentro de este grupo podemos identificar al N hidrolizable (Nhid). Este incluye fracciones solubles y formas intercambiables de N-NH₄⁺, una fracción soluble del N orgánico y el N liberado de las células microbianas (Sharifi *et al.*, 2007). En cambio, los indicadores biológicos como lo es el N incubado en condiciones anaeróbicas (Nan), cobran relevancia debido a su sensibilidad y rápida respuesta para evidenciar cambios que se producen

en el suelo por el manejo (Fabrizzi *et al.*, 2003). Además, es un indicador indirecto de la actividad biológica del suelo. El Nan es la fracción soluble del N en forma de NH_4^+ , junto al N orgánico que se mineralizará en NH_4^+ mediado por microorganismos heterótrofos anaeróbicos (St. Luce *et al.*, 2011). Según diferentes autores (Bushong *et al.*, 2007; Soon *et al.*, 2007) el Nan es la metodología más promisoriosa y la más utilizada, debido a que emula de manera precisa al Npm determinado mediante incubaciones aeróbicas de largo plazo.

Las fracciones lábiles de la MO tienen una importante participación en la dinámica del N (Cozzoli *et al.*, 2010). Estas están muy ligadas a la productividad por que influyen en la disponibilidad de nutrientes (Wander, 2004), especialmente sobre el N. La MO particulada (MOP) está principalmente compuesta de los residuos vegetales provenientes de los cultivos parcialmente descompuestos, que pueden proporcionar un 25 a 60% del N mineralizado (Ford & Greenland, 1968). Por su parte, Boone (1994) encontró que esta fracción lábil sólo contribuye un 2 a 13% del N mineralizado. Otra fracción lábil de carbono (C) de gran importancia, la constituyen los hidratos de carbono (CH) totales o solubles (CHt y CHs, respectivamente), que son utilizados como sustrato energético por los microorganismos del suelo (Chesire, 1979).

Las formas orgánicas de N constituyen hasta el 95% del N total en la capa arable de los suelos. A pesar de la gran cantidad de N orgánico que se encuentra en el suelo, se estima que sólo del 1 al 3% del total es mineralizado (Keeney, 1982; Curtin & Wen, 1999). La intensificación de la agricultura en los últimos años ha producido un detrimento en el contenido de MO de los suelos (Sainz Rozas *et al.*, 2011) afectando a las fracciones orgánicas del suelo. Por otra parte, la implementación de los sistemas de labranza de conservación, como la siembra directa (SD) ha afectado la capacidad de mineralización de N en el suelo (Sharifi *et al.*, 2007). Además, la

SD produce un aumento de la fracción activa de N orgánico como resultado de la acumulación en superficie de los residuos provenientes de los cultivos (Mikha & Rice, 2004). Sin embargo, se ha informado de que los aumentos en N orgánico bajo este sistema no siempre están asociados con aumentos en la mineralización de N (Curtin & Wen, 1999).

Los cereales de invierno-trigo (*Triticum aestivum* L.) y cebada (*Hordeum vulgare* L.)-son la base de los sistemas productivos en una amplia región del sudoeste bonaerense (SOB) (Martinez *et al.*, 2015). La erraticidad de las precipitaciones es la principal característica que define al SOB. Además, esta variabilidad en las precipitaciones hace que los cultivos dependan fundamentalmente del efecto climático y que el aporte de materia orgánica particulada (MOP) por parte de los cultivos sea altamente variable, de acuerdo a las condiciones climáticas particulares del año. En la región semiárida y subhúmeda del SOB, con suelos de texturas gruesas y bajos niveles de MO, no existe información sobre la mineralización del N proveniente de la descomposición de los residuos de los cultivos y de la MO del suelo. Además, en la actualidad no existen estudios que establezcan las relaciones entre los indicadores rápidos de mineralización- como el Nan y el Nhid- con las fracciones orgánicas del suelo en regiones semiáridas y subhúmedas. Teniendo en cuenta las condiciones mencionadas sobre estas regiones, la hipótesis planteada es que estos indicadores rápidos de la mineralización, debido a la variabilidad en los aportes de MOP, van a estar más relacionados a las fracciones orgánicas de carbono (C) y N recalitrantes con respecto a las más lábiles.

El objetivo de este estudio fue evaluar al Nan y Nhid, y la relación con las fracciones orgánicas de C y N del suelo, lábiles y recalitrantes en varios suelos representativos del SOB.

Materiales y Métodos

Durante los años 2010 y 2011 se muestrearon 78 lotes de productores destinados al cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.) y de cebada cervicera (*Hordeum vulgare* L.) bajo SD, situados en 13 sitios en el SOB (Figura 1), dentro de lo que comprende la región semiárida y subhúmeda. Las características de los sitios y lotes se encuentran en la Tabla 1.

En cada uno de los lotes se seleccionaron tres áreas de muestreo georreferenciadas, homogéneas y uniformes de aproximadamente 50 m², siendo estas representativas de los lotes para reducir la variabilidad espacial. El muestreo se llevó a cabo en esas áreas de muestreo en las profundidades de 0-20 cm, durante

el invierno antes de la siembra del cultivo de trigo o cebada. Se secaron las muestras al aire y se tamizaron por una malla de 2 mm. Se analizaron las siguientes variables edáficas para clasificar a los sitios: carbono orgánico total (COT) por combustión seca con analizador automático Leco (Leco Corporation, St Joseph, MI), fósforo extraíble (Pe, Bray & Kurtz, 1945), N orgánico total (Nt) por el método Kjeldahl (Bremner & Mulvaney, 1982) y pH en suspensión suelo-agua 1:2,5. Como parámetros físicos se estimó la granulometría por tamaño de partículas por fraccionamiento físico de la MO. Esta metodología fue propuesta por Galantini *et al.* (2006) y Duval *et al.* (2013). Consistió en el fraccionamiento del suelo por tamaño de partícula con una malla

Figura 1: Ubicación de los sitios muestreados.

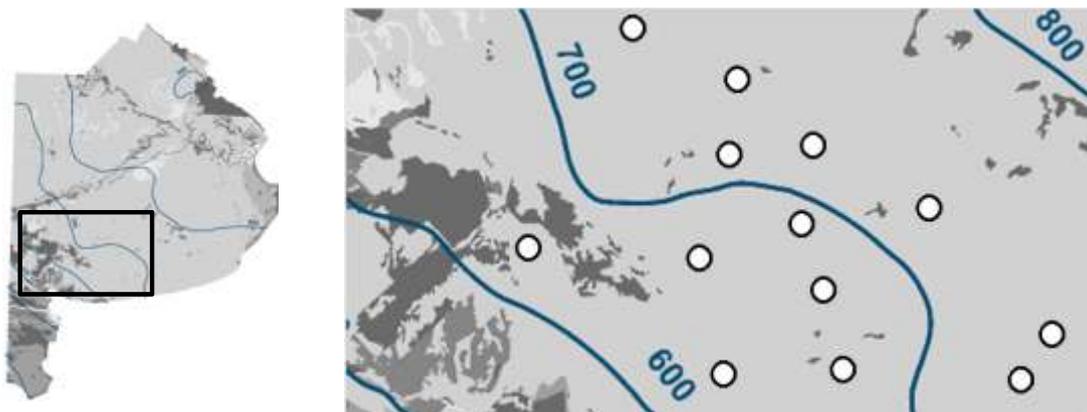


Tabla 1: Características generales, edáficas y climáticas de los sitios seleccionados.

Sitio	Locación	n	Tipo de suelo	Cultivos	Temperatura			Pp
				antecesores	Media	máx	mín	
				%		°C		
1	García del Río	2	Haplustol Típico	Avena (50); Soja (50)	14,9	21,3	8,5	690
2	Las Oscuras	17	Argiustol Típico	Trigo (60); Arveja (20); Maíz (20)	15,0	21,4	8,6	669
3	Saldungaray	12	Argiustol Típico	Trigo (74); Girasol (26)	14,7	21,0	8,3	694
4	Cnel. Rosales	4	Haplustol Entico	Cebada (100)	14,9	21,3	8,6	664
5	Cnel. Pringles	4	Haplustol Típico	Trigo (60); Cebada (20); Mijo(20)	14,8	21,1	8,4	686
6	Falcón	3	Haplustol Típico	Trigo (100)	15,0	21,2	8,6	692
7	Tornquist	9	Argiudol Típico	Trigo (44); Girasol (44); Soja (12)	14,5	20,9	8,2	740
8	Cnel Dorrego	7	Argiudol Típico	Cebada (64); Girasol (12); Avena (12); Trigo (12)	14,7	20,9	8,4	726
9	Tornquist	5	Argiudol Típico	Cebada (40); Girasol (40); Avena (20)	14,3	20,7	8,0	756
10	El Pérdido	5	Argiudol Típico	Trigo (60); Cebada (40)	14,7	20,9	8,4	726
11	Pigue	4	Argiudol Típico	Soja (100)	13,8	20,2	7,5	796
12	Tornquist	4	Argiudol Típico	Trigo (75); Girasol (25)	14,5	20,9	8,2	741
13	Tornquist	2	Argiudol Típico	Girasol (100)	14,4	20,8	8,0	753

n, número de lotes por sitio; Cultivo antecesor, en paréntesis () los porcentajes de cada cultivo como antecesor por sitio; Temperaturas: máx, máxima media; mín, mínima media. Pp, precipitaciones anuales medias. Cebada (*Hordeum vulgare* L.); Girasol (*Helianthus*

de 53 micrones, obteniendo una fracción de 53-2000 micrones compuesta de arena junto al CO de esa fracción y una fracción menor de 53 micrones, en la cual se encuentran la fracción limo y arcilla junto al CO en forma mineral. Por lo cual, se procedió a descontarle el porcentaje de MO a cada fracción (mayor y menor de 53 micrones), obteniéndose una estimación de las fracciones arena y la compuesta de limo+arcilla (Tabla 2).

Indicadores de la mineralización

Se determinaron dos indicadores rápidos de la mineralización que se detallan a continuación:

Nitrógeno mineralizado en anaerobiosis

El nitrógeno anaeróbico (Nan) fue determinado siguiendo el método de Waring & Bremner (1964), mediante una incubación

de corto plazo. Se colocan 5,00 g de suelo en un tubo de ensayo y se adiciona 25 mL de agua destilada. Se tapan los tubos y se incuban durante 7 días a 40 °C bajo condiciones de anoxia. Después de la incubación, las muestras se transfirieron a un matraz de destilación y se adicionó 25 mL de KCl 4M y se determinó el N-NH⁺ por destilación con arrastre de vapor (Mulvaney, 1996). El Nan se calculó restando la cantidad de N inorgánico en forma de amonio extraído con KCl 2M a temperatura ambiente sin incubar, a partir de la cantidad obtenida en el extracto incubado (Wang et al., 2001).

Nitrógeno hidrolizable

El N lábil hidrolizable (Nhid), se determinó a través de una digestión del suelo, con una solución con sal fuerte de KCl 2M, siguiendo lo propuesto por Gianello & Bremner (1986). El

Tabla 2: Propiedades químicas y físicas de los suelos (medias y desvíos estándar) por sitios.

Sitios	MO		Pe		pH		arena		limo+arcilla	
	g kg ⁻¹		mg kg ⁻¹						g kg ⁻¹	
	media	DS	media	DS	media	DS	media	DS	media	DS
1	25,5	1,7	13,0	1,4	7,2	1,2	549	136	451	136
2	23,9	7,7	14,7	5,6	6,0	0,2	553	202	446	179
3	36,6	10,3	12,8	9,8	7,1	0,6	423	108	577	70
4	16,0	3,4	13,4	2,3	6,1	0,2	690	177	310	156
5	27,3	5,7	6,9	8,5	6,4	0,7	451	105	549	105
6	27,6	19,8	27,6	22,5	6,4	1,0	593	349	407	343
7	29,2	5,0	14,6	9,4	6,3	0,2	463	93	537	68
8	29,1	6,0	11,8	5,1	6,6	0,4	566	119	433	111
9	32,3	7,7	23,3	12,9	6,4	0,1	424	111	575	103
10	22,4	2,8	10,9	5,0	6,2	0,2	601	174	399	162
11	45,2	8,1	13,5	7,1	6,2	0,2	329	100	671	100
12	35,4	3,6	12,4	9,8	6,4	0,4	381	78	619	64
13	35,6	0,7	19,2	9,8	6,4	0,1	365	51	634	51
<i>media</i>	30,0	6,4	14,9	8,4	6,4	0,4	491	138	508	126

DS, desvío estándar. MO, materia orgánica del suelo; Pe, fosforo extraíble.

procedimiento implicaba la digestión de 3,00 g de suelo en 20 mL de la solución a 100°C en un bloque digestor durante 4 h. Luego del enfriado de la muestra, se determinó el N-NH₄⁺ por destilación con arrastre de vapor (Mulvaney, 1996). Luego se sustrajo el N-NH₄⁺ inicial del suelo sin incubar determinándose el N hidrolizable.

Fraciones orgánicas

Carbono y nitrógeno orgánico particulado

Para el fraccionamiento por tamaño de partícula de la MO, se utilizó el tamizado en húmedo del suelo (Galantini, 2005; Duval *et al.*, 2013). Básicamente, 50 g de suelo previamente seco al aire y tamizado (2 mm) se dispersó en recipientes de vidrio de 120 mL con 100 mL de agua destilada. Se agregaron diez bolitas de vidrio (5 mm de diámetro) para incrementar la destrucción de los agregados y reducir posibles problemas creados por diferentes contenidos de arena (Elliott & Cambardella, 1991). Las muestras fueron sometidas a dispersión mecánica a través de un agitador rotatorio durante aproximadamente 16 h a 40 rpm para desintegrar los agregados. El tamizado se realizó con un tamiz de 53 micrones de diámetro de malla, hasta que el agua que sale fuera clara a simple vista. Así se obtuvieron dos fracciones: una fracción gruesa (FG, 53-2000 micrones) en la que se encuentra el carbono orgánico particulado (COP) y las arenas, y la fracción fina (FF < 53 micrones) la cual contiene el carbono orgánico asociado a la fracción mineral (COM) más limo y arcilla. El contenido de C en la FG se determinó utilizando la misma metodología que el COT, mediante analizador automático Leco. El N de la FG (NOP) se determinó siguiendo el procedimiento de Bremner & Mulvaney (1982). Luego, se determinó por diferencia entre el contenido total de C y de N con las fracciones particuladas el COM y N orgánico asociado a la fracción mineral (NOM)

Hidratos de carbono

La determinación se realizó siguiendo el procedimiento propuesto por Puget *et al.*, (1999). La extracción de los CHT se realizó por una hidrólisis ácida. Una alícuota de 1,00 g de muestra de suelo se trató con 10 mL de H₂SO₄ 0,5 M y se mantuvo a 80°C durante 24 h. La extracción de los CHs se obtuvo a partir de una suspensión de 1

g de muestra de suelo en 10 mL de agua destilada, que se calentó a 80 °C durante 24 h. Después de la extracción se procedió para ambos extractos de la misma manera. Para cada forma (total o soluble), se centrifugó a 4000 rpm durante 15 minutos (Puget *et al.*, 1999) y luego se midió por el método de espectrometría de fenol-sulfúrico con curva estándar de glucosa (Dubois *et al.*, 1956).

Análisis estadístico

Dado que el objetivo del estudio fue evaluar la relación de los indicadores rápidos de mineralización con las fracciones orgánicas del suelo y que los suelos utilizados pertenecen a un amplio sector del SOB, con diferencias en las propiedades edáficas marcadas, se procedió a agrupar los suelos según fracciones orgánicas. Se realizó un análisis de clúster para agrupar los suelos semejantes basados en las propiedades edáficas relacionadas con las medias de las fracciones orgánicas (COT, Nt, COP, NOP) y el contenido de limo+arcilla que se encuentra altamente ligado a las fracciones orgánicas (Galantini *et al.*, 2004), teniendo en cuenta la distancia de Ward. El corte del grado de agrupamiento de los sitios de realizó en el 50% de la distancia total (Balzarini *et al.*, 2008).

Se realizó la estadística descriptiva de los indicadores de mineralización estudiados para todos los sitios y según grupo de suelos. Se realizó un test t de medias para comparar los valores de Nan y Nhid para ambos grupos de suelos y también para comparar las fracciones orgánicas. Se realizaron regresiones lineales simples para comprobar la relación entre los indicadores de la mineralización. Se realizaron correlaciones de Pearson entre el Nan y Nhid con las fracciones orgánicas estudiadas según grupo de suelo separado por análisis de clúster. Luego se realizó el análisis multivariado de componentes principales (ACP) para observar la influencia global de todas las fracciones orgánicas estandarizadas según la matriz de correlación sobre los indicadores de mineralización, según grupo de suelo. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2013).

Resultados y Discusión

Propiedades de los suelos

En general, para todos los sitios el contenido de MO del suelo varió entre 16 y 45 g kg⁻¹ con un valor medio de 30 g kg⁻¹ (Tabla 2). Las diferencias halladas entre los valores de MO demuestran la variabilidad edáfica de los sitios evaluados. El pH de los suelos presentó valores neutros a levemente ácidos típicos de la región semiárida pampeana (Landriscini *et al.*, 2015), con una media de 6,4, con un rango que osciló entre 6,0 y 7,2. Granulométricamente, los suelos poseen niveles de arenas que oscilaron entre 365 y 690 g kg⁻¹ con un valor medio de 490 g kg⁻¹. Además, teniendo en cuenta la cantidad fracción fina (limo+arcilla) se verifica la relación significativa y positiva (datos no mostrados) con el COT, en coincidencia a lo hallado por (Galantini *et al.*, 2004) trabajando en suelos de Bordenave con un rango amplio de texturas.

El análisis de clúster mediante las propiedades evaluadas permitió identificar dos grupos de suelos (grupo A y B) (Figura 2). Los sitios del Grupo A presentaron valores más elevados de todas las fracciones orgánicas analizadas. Debido a esta agrupación habría que evaluar los resultados según los grupos obtenidos teniendo en cuenta estas propiedades.

Nitrógeno anaeróbico e hidrolizable

Los valores promedios de Npm hallados para todos los sitios, se encontraron en los rangos entre 6,5-50,4 mg kg⁻¹ y 10,7-81,9 mg kg⁻¹ para Nhid y Nan, respectivamente (Tabla 3). Los valores de Nan se encuentran en los rangos hallados por otros autores para Argiudoles y Paleudoles Típicos (Echeverría *et al.*, 2000; Cozzoli *et al.*, 2010; Reussi Calvo *et al.*, 2013). Por su parte, Reussi Calvo *et al.* (2011) reportaron valores de Nan entre 25-115 mg kg⁻¹ para la provincia de Buenos Aires, con menores valores hacia el Oeste. Los valores de Nhid fueron semejantes a los hallados por Wang *et al.* (2001) para 19 suelos de Australia con variabilidad en las propiedades químicas.

Al analizar los sitios del grupo A y B (Tabla 3), se hallaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en Nan con mayores valores en el primer grupo, mientras que con Nhid no ocurrió lo mismo ($p > 0,05$). Esto demuestra que el Nan es más sensible ante las diferencias en las condiciones edáficas-más precisamente a la variación de las fracciones orgánicas-en coincidencia a lo reportado por Echeverría *et al.* (2000), quienes trabajaron en suelos del Sudeste bonaerense en 0-20 cm.

Al analizar la relación entre ambos indicadores comparando los sitios según su agrupación por el análisis de clúster (datos no mostrados), para los suelos del grupo A se hallaron relaciones significativas entre Nan y Nhid, con un coeficiente de explicación de bajo ajuste ($R^2=0,18$ y $p=0,01$), mientras que para los del grupo B no se hallaron relaciones significativas ($p=0,35$). Esto refleja que ambos indicadores provienen de fracciones

orgánicas de diferente origen según las características de los suelos en coincidencia a lo informado por St. Luce *et al.* (2011).

Fraciones orgánicas del suelo

Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 4. A nivel general, se observaron elevados CV en las fracciones orgánicas, demostrando la variabilidad en las propiedades edáficas de cada suelo y dentro de cada grupo de suelos. El COP representó un 22 y 19% del COT para los suelos de los grupos A y B, respectivamente, reflejando la baja proporción de materiales lábiles que poseen estos suelos. Esto coincide con lo hallado por Galantini *et al.* (2002) trabajando en Haplustoles de la región, quienes citaron valores que oscilaron entre 17-22 %. La proporción de Nt con respecto a la MO fue similar en ambos grupos de suelos, siendo aproximadamente un 5 % de la MO, mientras que el NOP se mantuvo en una proporción del Nt del 17 y 15 % para los suelos del grupo A y B, respectivamente.

Cuando se compararon los grupos de suelos, se observaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en todas las fracciones orgánicas, presentando los suelos del grupo A los mayores niveles (Tabla 4).

Relaciones de los indicadores rápidos con las fracciones orgánicas

Para los suelos del grupo A, se hallaron relaciones significativas del Nan con COT, COM, Nt, NOM, CHt y CHs (Tabla 5). Mientras que el Nhid presentó asociaciones significativas con COT, COM, NOM, CHt y CHs. Para los suelos del grupo B, se hallaron relaciones significativas del Nan con COP, Nt, NOP, NOM, CHt y CHs. En cambio, para Nhid no se halló ninguna correlación significativa con las fracciones orgánicas evaluadas.

Figura 2: Dendograma de similaridad de los sitios según las fracciones orgánicas evaluadas mediante distancia de Ward.

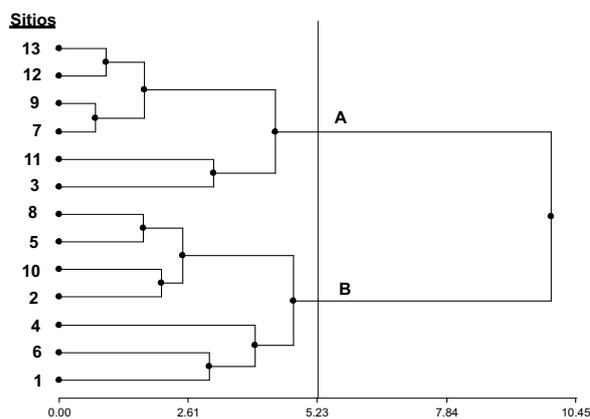


Tabla 3: Resultados de los indicadores de la mineralización de N (estadística descriptiva) por cada sitio y de acuerdo a la agrupación de sitios del análisis de cluster.

Indicador/		Media	DS	mínimo	máximo	CV
grupo suelo	n					
Nhid ^{ns}	A	25,1	7,9	11,9	45,5	31
	B	21,5	8,9	6,5	50,4	41
Nan ^{**}	A	47,0	20,5	16,5	81,9	44
	B	33,4	14,4	10,7	73,7	43

n= número de lotes agrícolas por establecimiento, DS, desvío estándar; CV, coeficiente de variación.

*, **, ***, ns; indican diferencias significativas al 0,05; 0,01; 0,001 y no significativas, respectivamente.

Con respecto a la hipótesis que plantea que los indicadores de la mineralización están más relacionados con las fracciones orgánicas más recalcitrantes, se confirma tanto para Nan como Nhid, pero sólo en los suelos del grupo A. Además, en ambos indicadores se hallaron que las correlaciones con los carbohidratos que son fracciones lábiles según la bibliografía (Puget *et al.*, 1999; Ghani *et al.*, 2003; Duval *et al.*, 2013)-fueron más consistentes. Esto es debido a que los CH son componentes que actúan como principales fuentes de energía para los microorganismos del suelo (Hu *et al.*, 1997; González-Chávez *et al.*, 2010). Por su parte, Angers *et al.* (1993) sugirieron que existe un enriquecimiento de CH en la MO bajo el sistema SD, por lo que estas determinaciones cobran relevancia cuando se quiere analizar la mineralización de N bajo este sistema de labranza. Indistintamente del grupo de suelo, se halló que el Nan se correlacionó significativamente con los CH. Esto es debido a que este N incubado en anaerobiosis consiste del NH_4^+ soluble junto al NH_4^+ mineralizado (St. Luce *et al.*, 2011), y el proceso de amonificación es llevado a cabo exclusivamente por microorganismos heterótrofos que utilizan al C de los polisacáridos como sustrato energético (Benbi & Richter, 2002).

El caso contrario se verificó en los suelos del grupo B, donde se hallaron correlaciones significativas del Nan con las fracciones lábiles del C y del N (COP y NOP) y los CH, siendo los sitios con menor contenido de fracción fina (Tabla 2). Estos resultados sugieren un posible efecto de protección física de las arcillas sobre las fracciones orgánicas más recalcitrantes (Hassink *et al.*, 1993; Balesdent *et al.*, 2000; St. Luce *et al.*, 2011) en los suelos del grupo A. Por su parte, las nulas correlaciones halladas entre Nhid con las variables edáficas en los suelos del grupo B, podría deberse a los menores contenidos de las fracciones orgánicas evaluadas, a pesar de no hallarse diferencias del Nhid entre grupos de suelos.

Estas relaciones halladas indican que tanto Nhid como Nan son variables de acuerdo a las características edáficas de los sitios (Griffin, 2008), por lo que sería necesario el agrupamiento de suelos de acuerdo a las fracciones orgánicas (COT, Nt, COP y NOP) para hacer evaluaciones de estos indicadores.

Teniendo en cuenta que las asociaciones lineales del Nan y Nhid con las fracciones orgánicas no demostraron elevados ajustes, con valores de r menores a 0,63 (Tabla 5), se procedió a realizar el ACP. Esto permitió visualizar la interacción de todas las fracciones orgánicas combinadas en función de cada uno de los indicadores de la mineralización. Este análisis permite construir ejes artificiales llamados CP, que permiten obtener gráficos de dispersión de observaciones y/o variables no correlacionadas, con propiedades óptimas para la interpretación de la variabilidad y covariabilidad subyacente (Balzarini *et al.*, 2008; Landriscini *et al.*, 2015). Cada variable está representada por un autovector que queda definido por la correlación que existe entre ésta y la CP considerada. El ángulo existente entre los vectores de las variables representa el grado de correlación entre las variables

medidas. En general, para el Nan se obtuvo una explicación total de la varianza de 80 % (Figura 3). El CP 1 fue el que mayormente explicó esa varianza (67,6 %) y estuvo altamente influenciado por COT, COM, Nt y CHs, explicado por la longitud de sus vectores y el paralelismo con este CP. Las variables más importantes en el CP2-con una explicación de la varianza de 12,4 %-fueron las fracciones más lábiles del C y N (COP y NOP).

Globalmente, se obtuvieron resultados que demuestran que principalmente las fracciones orgánicas más recalcitrantes (COT, COM, y Nt) junto a los CH están relacionadas positivamente con el Nan, debido a que demuestran los vectores con mayores longitudes. A su vez estas relaciones estuvieron asociadas positivamente a los suelos del grupo A, debido su ubicación dentro del biplot (Figura 3). Esto fue dado por el mayor contenido de estas fracciones orgánicas en los suelos del grupo A.

Tabla 4: Concentración de las fracciones orgánicas del suelo para todos los suelos y según grupo de suelos.

Fracción orgánica	Grupo suelo	Media	DS	CV
		(g kg ⁻¹)		%
COT***	A	19,8	5,3	27
	B	14,9	5,1	35
COP***	A	4,4	1,3	30
	B	2,6	1,0	39
COM***	A	15,9	4,4	27
	B	11,8	4,6	39
Nt***	A	1,7	0,4	24
	B	1,3	0,4	33
NOP*	A	0,30	0,12	40
	B	0,18	0,09	51
NOM***	A	1,45	0,37	25
	B	1,12	0,41	37
CHt**	A	6,6	1,2	18
	B	5,6	1,6	28
CHs***	A	0,79	0,19	24
	B	0,61	0,18	30

COT, carbono orgánico total (g kg⁻¹); COP, carbono orgánico particulado (g kg⁻¹); COM, carbono asociado a la fracción mineral (g kg⁻¹); Nt, nitrógeno orgánico total (g kg⁻¹); NOP, nitrógeno orgánico particulado (g kg⁻¹); NOM, N asociado a la fracción mineral (g kg⁻¹); *, **, ***, ns; indican diferencias significativas al 0,05; 0,01; 0,001 y no significativas, respectivamente.

Tabla 5: Correlaciones de Pearson entre Nan y Nhid con las fracciones orgánicas evaluadas según grupo de suelo

Indicador de mineralización	Grupo cluster	COT	COP	COM	Nt	NOP	NOM	CHt	CHs
		Coeficiente de correlación (r)							
Nan	A	0,49	-0,09	0,59	0,61	0,04	0,67	0,58	0,59
	B	0,30	0,43	0,27	0,59	0,36	0,53	0,33	0,63
Nhid	A	0,38	-0,06	0,45	0,31	-0,01	0,35	0,41	0,46
	B	-0,25	0,01	-0,002	0,24	0,10	0,21	0,05	0,15

En negrita y en cursiva se hallan las correlaciones significativas (p<0,05).

Con respecto al Nhid la explicación total de la varianza de los dos CP fue de 78,3 % (Figura 4). La CP1 explicó el 64,9 % de la variabilidad total, siendo las variables más importantes el COT, COM, Nt y CHs, mientras que la variable más importante del CP2 fue el NOP. Nuevamente, en este caso se halló una mayor preponderancia de las fracciones orgánicas más recalcitrantes y del CHs sobre el Nhid. Estos resultados afirman la hipótesis planteada, ya que los indicadores de la mineralización están más relacionados a las fracciones orgánicas más recalcitrantes, pudiendo deberse a la menor proporción de la MOP en estos sitios.

En este estudio, se pudo comprobar que la relación entre los indicadores de mineralización y las diferentes fracciones orgánicas de los suelos sería dependiente del contenido de fracción fina de los mismos (limo+arcilla). Es por esto, que el análisis de clúster permite separar suelos con variabilidad edáfica en condiciones similares para lograr comparaciones certeras. Si no se hubieran agrupado los suelos por sus fracciones orgánicas se podría enmascarar alguna relación sobre los indicadores rápidos de mineralización.

Figura 3: Biplot generado a partir del ACP utilizando todas las fracciones orgánicas en función del Nan.

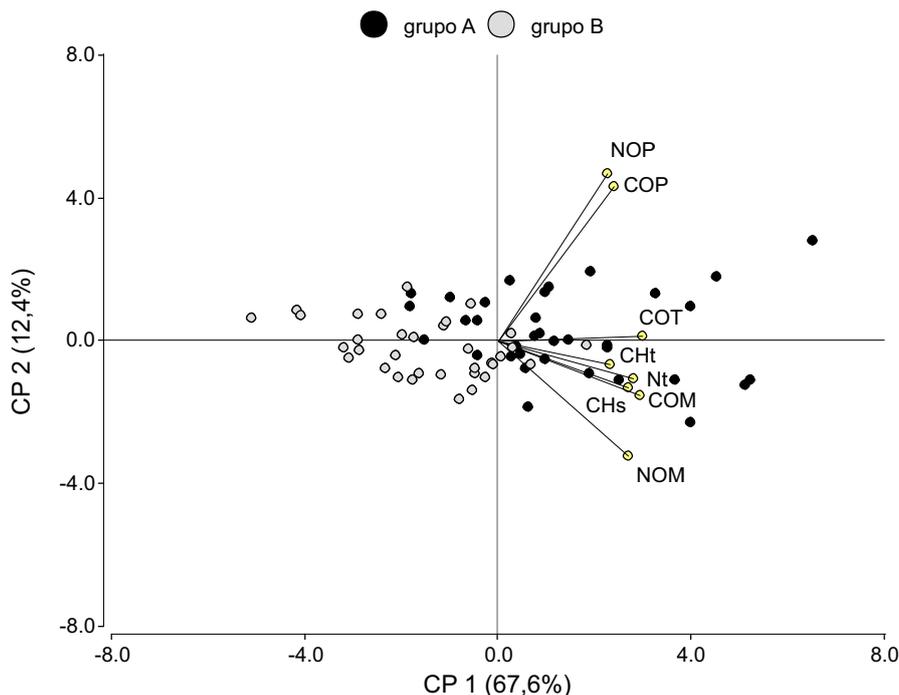
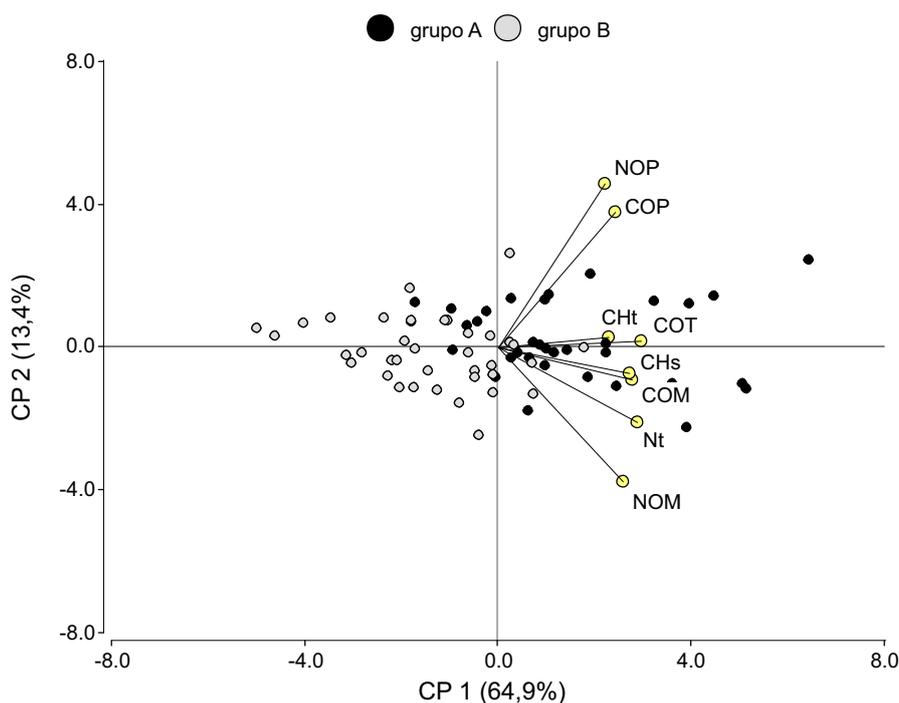


Figura 4: Biplot generado a partir del ACP utilizando todas las fracciones orgánicas en función del Nhid.



Conclusiones

El Nan resultó ser el indicador de mineralización más sensible ante diferencias edáficas de los sitios, debido a que se encontraron diferencias significativas entre ambos grupos de suelos.

El Nan y Nhid están relacionados con las fracciones orgánicas en estos suelos donde los aportes de MOP por parte de los residuos de los cultivos son erráticos por las condiciones climáticas características del SOB.

Esto permite concluir que las relaciones entre los indicadores estudiados y las fracciones orgánicas difieren según las condiciones edáficas y deben ser calibradas en base a estas fracciones.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los productores de la Regional Bahía Blanca de AAPRESID, por ceder sus establecimientos para la realización de los ensayos y a Profertil Nutrientes por financiar estos estudios.

Bibliografía

1. **ANGERS DA, BISSONNETTE N, LOGBRE A, SAMSON N** (1993) Microbial and biochemical changes induced by rotation and tillage in a soil under barley production. *Canadian Journal of Soil Science*, 73:39-50.
2. **BALESDENT J, CHENU C, BALABANE M** (2000) Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research*, 53:215-230.
3. **BALZARINI MG, GONZÁLEZ L, TABLADA M, CASANOVES F, DI RIENZO JA, ROBLEDO CW** (2008) *Infostat: Manual del Usuario*. Córdoba. Editorial Brujas.
4. **BENBI DK, RICHTER J** (2002) A critical review of some approaches to modelling nitrogen mineralization. *Biology and Fertility of Soils*, 35(3):168-183.
5. **BOONE RD** (1994) Light-fraction soil organic matter: origin and contribution to net nitrogen mineralization. *Soil Biology & Biochemistry*, 26:1459-1468.
6. **BRAY R, KURTZ L** (1945) Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Science*, 59:39-45.
7. **BREMMER AE, MULVANEY CS** (1982) Total nitrogen. En: Page, C et al. (Eds.) *Methods of soil analysis, Part 2*. Wisconsin USA. American Society of Agronomy and Soil Science Society of American Journal, p. 595-624.
8. **BUNDY LG, MEISINGER JJ** (1994) Nitrogen availability Indices. En: Weaver, RW et al. (Eds). *Methods of soil Analysis. Part 2, Microbiological and Biochemical Properties* N° 5.. American Society of Agronomy and Soil Science Society of American Journal, p. 951-984.
9. **BUSHONG JT, NORMAN RJ, ROSS WJ, SLATON NA, WILSON CE, GBURR EE** (2007) Evaluation of several indices of potentially mineralizable soil nitrogen. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38:2799-2813.
10. **CHESIRE MV** (1979) *Nature and origin of carbohydrates in soils*. Londres, Inglaterra. Editorial Academic Press Inc.
11. **COZZOLI MV, FIORITI N, STUDDERT G, DOMINGUEZ 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.
12. **CURTIN D, WEN G** (1999) Organic matter fractions contributing to soil nitrogen mineralization potential. *Soil Science Society of America Journal*, 63:410-415.
13. **DI RIENZO JA, CASANOVES F, BALZARINI MG, GONZÁLEZ L, TABLADA M, ROBLEDO CW** (2013) *InfoStat versión 2013*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
14. **DUBOIS M, GILLES KA, HAMILTON JK, REBERS PA, SMITH F** (1956) Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Anal of Chemistry*, 28:350-356.
15. **DUVAL ME, GALANTINI JA, IGLESIAS JO, CANELO S, MARTINEZ JM, WALL L** (2013) Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems. *Soil and Tillage Research*, 131:11-19.
16. **ECHEVERRÍA H, BERGONZI R, FERRARI J** (1994) Un modelo para estimar la mineralización de nitrógeno en suelos del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Ciencia del Suelo*, 12:56-62.
17. **ECHEVERRÍA HE, STRADA RA, STUDDERT GA** (2000) Métodos rápidos de análisis de plantas para evaluar la nutrición nitrogenada del cultivo de trigo. *Ciencia del Suelo*, 18:105-114.
18. **ELLIOTT ET, CAMBARDELLA CA** (1991) Physical separation of soil organic matter. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 34:407-419.
19. **FABRIZZI K, MORÓN A, GARCIA F** (2003) Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. Non-degraded Mollisols in Argentina. *Soil Science Society of America Journal*, 67: 1831-1841.
20. **FAGERIA NK, BALIGAR VC** (2005) Enhancing nitrogen Use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy*, 88:97-185.
21. **FORD GW, GREENLAND DJ** (1968) The dynamics of partly humified organic matter in some arable soils. En: Holmes, JW (Ed). *Transactions of the International Congress of Soil Science*, 9th, Adelaide. Nueva York, USA. Editorial El Sevier. p. 403-410.
22. **GALANTINI JA** (2005) Separación y análisis de las fracciones orgánicas. En: Marban, L et al. (Eds). *Información y Tecnología en los Laboratorios de Suelos para el Desarrollo Agropecuario Sostenible*. Editorial Asociación Argentina de Ciencia del Suelo, p. 103-114.
23. **GALANTINI JA, IGLESIAS JO, MANEIRO C, SANTIAGO L, KLEINE C** (2006) Sistemas de labranza en el sudoeste bonaerense. Efectos de largo plazo sobre las fracciones orgánicas y el espacio poroso del suelo. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA-INTA)*, 35:15-30.
24. **GALANTINI JA, ROSELL RA, BRUNETTI G, SENESI N** (2002) Dinámica y calidad de las fracciones orgánicas de un Haplustol durante la rotación trigo-leguminosas. *Ciencia del Suelo*, 20:17-26.
25. **GALANTINI JA, SENESI N, BRUNETTI G, ROSELL RA** (2004) Influence of texture on the nitrogen and sulphur status and organic matter quality and distribution in semiarid Pampean grassland soils. *Geoderma*, 123:143-152.
26. **GHANIA, DEXTER M, PERROTT KW** (2003) Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation. *Soil Biology and Biochemistry*, 35:1231-1243.
27. **GANELLO C, BREMNER JM** (1986) Simple chemical method of assessing potentially available organic nitrogen in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 17:195-214.

28. **GONZALEZ-CHAVEZ MA, AITKENHEAD-PETERSON JA, GENTRY TJ, ZUBERER D, HONS F, LOEPPERT R** (2010) Soil microbial community, C, N, and P responses to long-term tillage and crop rotation. *Soil and Tillage Research*, 106:285-293.
29. **GRIFFIN TS** (2008) Nitrogen availability. En: Schepers JS, Raun WR (Eds) Nitrogen in agricultural soils. Agron. Monogr. 49. Wisconsin, USA. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. p. 616-646.
30. **HASSINK J, BOUWMAN LA, ZWART KB, BLOEM J, BRUSSAARD L** (1993) Relationships between soil texture, physical protection of organic matter, soil biota, and C and N mineralization in grassland soils. *Geoderma*, 57:105-128.
31. **HU S, COLEMAN DC, CARROLL CR, HENDRIX PF, BEARE MH** (1997) Labile soil carbon pools in subtropical forest and agricultural ecosystems as influenced by management practices and vegetation types. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 65:69-78.
32. **KEENEY D, BREMNER JM** (1966) Determination and isotope ratio analysis of 10 different forms of nitrogen in soil: 3. Exchangeable ammonium, nitrate and nitrite by extraction-distillation methods. *Soil Science Society of America Journal*, 30:577-582.
33. **KEENEY DR** (1982) Nitrogen management for maximum efficiency and minimum pollution. En: Stevenson, FJ (Ed). Nitrogen in agricultural soils. Agronomy Monograph N° 22. Wisconsin, USA. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. p. 605-649.
34. **LANDRISCINI MR, MARTÍNEZ JM, GALANTINI JA** (2015) Fertilización foliar con nitrógeno en trigo en el sudoeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*, 33: en prensa.
35. **MARTÍNEZ JM, GALANTINI JA, LANDRISCINI MR** (2015) Diagnóstico de fertilidad nitrogenada en el sudoeste bonaerense mediante el uso de un clorofilómetro en trigo. *Ciencia del Suelo*, 33:31-44.
36. **MIKHAMM, RICE CW** (2004) Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 68:809-816.
37. **MULVANEY RL** (1996) Nitrogen- Inorganic forms. En: Sparks, DL et al. (Eds). *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. Wisconsin, USA. Soil Science Society of America. p. 1123-1184.
38. **MULVANEY RL, KHAN SA, HOEFT RG, BROWN HM** (2001) A soil organic nitrogen fraction that reduces the need for nitrogen fertilization. *Soil Science Society of America Journal*, 65:1164-1172.
39. **PUGET P, ANGERS DA, CHENU C** (1999) Nature of carbohydrates associated with water-stable aggregates of two cultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 31:55-63.
40. **REUSSI CALVO NI, ECHEVERRÍA HE, SAINZ ROZAS H, BERARDO A, DIOVISALVI N** (2011) Nitrógeno incubado en anaerobiosis: ¿Herramienta complementaria para el diagnóstico de nitrógeno en trigo? En: Simposio Fertilidad. Rosario, Argentina. IPNI Publ. p. 207-210.
41. **REUSSI CALVO NI, SAINZ ROZAS H, ECHEVERRÍA HE, BERARDO A** (2013) Contribution of anaerobiosis incubated nitrogen to the diagnosis of nitrogen status in spring wheat. *Agronomy Journal*, 105:321-328.
42. **SAINZ ROZAS H, ECHEVERRÍA HE, ANGELINI H** (2011) Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana argentina. *Ciencia del Suelo*, 29:29-37.
43. **SHARIFI M, ZEBARTH BJ, BURTON DL, GRANT CA, BITTMAN S, DRURY CF, MCCONKEY BG, ZIADI N** (2007) Response of potentially mineralizable soil nitrogen and indices of nitrogen availability to tillage system. *Soil Science Society of America Journal*, 72:1124-1131.
44. **SOON YK, HAQ A, ARSHAD MA** (2007) Sensitivity of nitrogen mineralization indicators to crop and soil management. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38:2029-2043.
45. **ST. LUCE MS, WHALEN JK, ZIADI N, ZEBARTH BJ** (2011) Nitrogen dynamics and indices to predict soil nitrogen supply in humid temperate soils. *Advances in Agronomy*, 112:55-102.
46. **STANFORD G, SMITH S** (1972) Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, 36:465-472.
47. **WALLEY F, YATES T, GROENIGEN JW, VAN KESSEL C** (2002) Relationship between soil nitrogen availability indices, yield, and nitrogen accumulation of wheat. *Soil Science Society of America Journal*, 66:1549-1561.
48. **WANDER MM**. 2004. Soil organic matter fractions and their relevance to soil function. En: Magdoff, F et al. (Eds). *Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture*. Boca Raton, USA. Editorial CRC Press. p. 67-102.
49. **WANG W, SMITH CJ, CHALK PM, CHEN D** (2001) Evaluating chemical and physical indices of nitrogen mineralization capacity with an unequivocal reference. *Soil Science Society of America Journal*, 65:368-376.
50. **WARING SA, BREMNER JM** (1964) Ammonium production in soil under waterlogged conditions as an index of nitrogen availability. *Nature*, 201:951-952.
51. **ZEBARTH BJ, DURY CF, TREMLAY N, CAMBOURIS AN** (2009) Opportunities for improved fertilizer nitrogen management in production of arable crops in eastern Canada: A review. *Canadian Journal of Soil Science*, 89:113-132.