



PÉRDIDA DE NITRÓGENO COMO NITRATO POR LIXIVIACIÓN EN SISTEMAS DE CULTIVO CONTINUO Y ROTACIÓN CULTIVO-PASTURA

Kathrin Grahmann (PhD, Investigadora Post-doctoral - Programa de Producción y Sustentabilidad Ambiental)
 Andrés Quincke (PhD, Investigador adjunto - Programa de Producción y Sustentabilidad Ambiental)
 Gualberto Soulier (Operario rural calificado - Programa de Producción y Sustentabilidad Ambiental)
 Héctor Vergara (Auxiliar de investigación - Programa de Producción y Sustentabilidad Ambiental)
 Verónica Ciganda (PhD, Directora del Programa de Producción y Sustentabilidad Ambiental)

INTRODUCCIÓN

Los requerimientos de nitrógeno (N) de los cultivos son cubiertos por el N mineral del suelo y por la aplicación de fertilizantes nitrogenados. Sin embargo, es posible que cantidades significativas de N se pierdan por lixiviación en suelos de textura más arenosa, en suelos ácidos o de pobre estructura, así como por una alta frecuencia de riego o por un manejo ineficiente de la fertilización nitrogenada (Cassman *et al.*, 2002). Un manejo eficiente del N requiere del conocimiento de las necesidades de los cultivos respecto a N y del aporte de N por el suelo. El N mineral en la solución del suelo está predominantemente presente como nitrato (N-NO_3^-) el cual

es escasamente retenido por las arcillas del suelo y por lo tanto es más fácilmente lavado o lixiviado por aguas que percolan hasta debajo de la zona de las raíces en donde los cultivos ya no los pueden utilizar. El N-NO_3^- se forma por la descomposición de formas orgánicas de N (por ej., materia orgánica, rastrojos de cultivo, y estiércol) llevada a cabo por microorganismos del suelo. Además, en el caso de las aplicaciones de fertilizantes amoniaca-les (por ej. urea), el nitrato se forma a partir del amonio por un proceso natural llamado nitrificación. Este proceso es acelerado por temperaturas ambientales elevadas, por ejemplo en verano, y por eventos intensos de lluvia. También, se ha reportado que suelos con pH elevados ($\text{pH} > 8$) favorecen la nitrificación (Norman *et al.*, 1987).

Las pérdidas de N por lixiviación pueden representar una considerable pérdida económica para el productor, ya sea del N proveniente del fertilizante o del propio suelo. Al mismo tiempo, cuando alcanza las napas y aguas subterráneas, el N-NO_3^- afecta la calidad de las aguas y aumentan los riesgos de su consumo tanto para personas como para animales. Por esta razón, se han establecido límites de concentración de 10 mg $\text{N-NO}_3^-/\text{L}$ en varias partes del mundo (Townsend *et al.*, 2003) para su potabilidad. Además, en aguas superficiales, la presencia de N-NO_3^- puede contribuir a los procesos de eutroficación.

La mayoría de los métodos para medir las pérdidas de lixiviación en agricultura se basan en mediciones puntuales, por ejemplo con lisímetros, platos de succión o copas porosas (Weihermüller *et al.*, 2007). Estos equipos permiten un muestreo dinámico y específico de la solución suelo-agua, pero perturban el suelo durante la instalación y por lo tanto necesitan ser instalados por un período largo de tiempo para lograr mediciones representativas.

El sistema de producción de cultivos (incluyendo tipo de laboreo, cantidad de residuos, rotación, práctica de riego y manejo de N), es el factor más determinante para definir las pérdidas por lixiviación. En sistemas de siembra directa con cultivos continuos, la estabilidad de agregados e infiltración de agua puede ser mayor comparado con sistemas convencionales de laboreo (Verhulst *et al.*, 2011). Además, estos sistemas pueden presentar mayores poblaciones de lombrices, lo cual aumenta la cantidad de bioporos facilitando la ocurrencia de una mayor lixiviación (Baumhardt y Lascano, 1996). Por otro lado, se ha reportado una nitrificación más lenta en sistemas bajo siembra directa durante los períodos de barbecho, lo cual podría reducir el potencial de lixiviación de N-NO_3^- comparado con el laboreo convencional (Power y Peterson, 1998).

IMPORTANCIA DE LAS PASTURAS Y LEGUMINOSAS EN EL RECICLAJE DE N

El nitrógeno total del suelo no sólo está determinado por el N naturalmente presente en el suelo y por el N agregado como fertilizante mineral, sino también por la fijación de N de leguminosas, la deposición de N y la fijación de N por bacterias no-simbióticas (Ernst y Siri-Prieto 2009). Díaz Rosselló (1992) estimó una acumulación de N total de 500 kg N/ha por cada ciclo de pastura en rotaciones de 50% cultivo y 50% pastura. Además, estimó un aporte de 1 kg N/ha por fijación biológica de N a través de leguminosas por cada 25 kg de biomasa seca producida por la leguminosa.

La mayoría de los estudios encontrados en la literatura respecto a las pérdidas de N-NO_3^- por lixiviación en sistemas de cultivos en rotación con pasturas, por lo general incluyen un laboreo de suelo al momento de eliminar la pastura perenne. Por lo tanto, pocos estudios se han

hecho en sistemas de siembra directa bajo condiciones locales donde la pastura es eliminada con varias aplicaciones de herbicidas antes de que se siembre el cultivo sin laboreo. Este estudio tiene como objetivo conocer los riesgos potenciales de lixiviación de nitratos en dos sistemas de producción contrastantes, a través de la cuantificación de su concentración en el agua de suelo colectada con la metodología de copas porosas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se llevó a cabo en el experimento de “Rotaciones viejas”, una plataforma agroambiental de largo plazo instalada en INIA-La Estanzuela en 1963, en la que se evalúa la sostenibilidad productiva y ambiental de distintos sistemas agrícolas de rotación cultivo-pastura. El suelo dominante es un Brunoso Eutrítico Típico y desde 2008 todo el experimento se maneja bajo siembra directa. Para este estudio se eligieron dos tratamientos contrastantes de la plataforma: 1. cultivo continuo con fertilización (CC); y 2. 50% de pastura (festuca, trébol blanco y lotus) en rotación con cultivos (CP). La pastura de este tratamiento no fue pastoreada. La información sobre el manejo de cada parcela se resume en la Tabla 1.

Las pérdidas de N-NO_3^- por lixiviación fueron medidas utilizando copas porosas de 60 cm de longitud (Soil Water Sampler, 1900 L24 Soilmoisture Equipment Corp.). Cada copa consiste de un tubo de PVC con uno de sus extremos cerrado con una cerámica porosa, la cual permite la entrada de la solución de suelo a 60 cm



Tabla 1 - Manejo de las parcelas durante el período del ensayo (CC: cultivo continuo con fertilización; CP: 3 años de cultivos en rotación con pastura mixta de 3 años).

	CC			CP		
	Cultivo	Siembra	N aplicado kg/ha	Cultivo	Siembra	N aplicado kg/ha
Verano 2015	Sorgo	23-Dic-14	120	Sorgo	23-Dic-14	65
Invierno 2015	Trigo	8-Jul-15	201	Trigo	8-Jul-15	201
Verano 2016	Sorgo	5-Ene-16	64	Soja	5-Ene-16	10
Primavera 2017	Maíz	14-Nov-16	110	Pastura	6-Oct-16	0
Invierno 2017	Cebada	7-Jun-17	204	Pastura		0
Verano 2018	Sorgo	28-Dic-17	198	Pastura		0
Invierno 2018	Trigo	19-Jun-18	209	Pastura		0
N total aplicado (kg/ha)			1106			275

de profundidad. El otro extremo de la copa permanece por encima del nivel del suelo y cerrado con un tapón de goma el cual se lo retira para cada colecta de agua. Este tapón dispone de un tubo para generar vacío en el interior de la copa (Figura 1).

Las copas fueron instaladas en julio 2015 en dos parcelas adyacentes de la plataforma (Figura 2) en un ángulo de 45° respecto a la horizontal para minimizar alteraciones de las condiciones del suelo.

Se instalaron 7 copas por tratamiento, con 35 repeticiones de medidas en el tiempo tomadas durante 3 años (2015-2018). Una vez instaladas las copas, se les realizó una presión inicial de vacío de -70 kPa, lo cual se repitió periódicamente luego de colectada cada muestra de agua. Las muestras de agua fueron colectadas utilizando una bomba y se determinó su concentración de nitratos con el método de potenciometría mediante electrodo en el laboratorio de suelos y aguas de INIA-LE.



Figura 1 - Detalles de la copa porosa.



Figura 2 - A) Construcción del túnel con un barreno para introducir la copas; B) Generación de vacío en el interior de la copa; C) Copa instalada en el campo bajo cultivo de sorgo cosechado.

En general, se colectaron muestras luego de eventos de lluvia mayores a 10 mm.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El volumen de agua colectado en las copas a lo largo de los tres años siguió un patrón muy similar entre ambos tratamientos (Figura 3), lo cual indicaría que el comportamiento del agua infiltrada en el suelo y su contribución al riesgo de lixiviar el N-NO₃ presente en el suelo hacia aguas subterráneas fue similar en el sistema de cultivo continuo y en el de cultivo-pastura.

Las concentraciones promedio mínimas y máximas de N-NO₃ en las muestras de agua colectadas variaron entre 0.4 y 123 ppm y entre 0.4 y 50 ppm para CC y CP, respectivamente (Figura 4). En el primer año de mediciones (agosto 2015-agosto 2016), en ambos tratamientos hubieron cultivos anuales invernales y estivales con aplicación de fertilizante nitrogenado. Bajo estas condiciones, aproximadamente en el 50% del total de muestreos durante este período se observó un nivel de concentración de N-NO₃ en el agua que podría estar indicando la ocurrencia de pérdida de N por lixiviación. Luego de instalar la pastura en el tratamiento CP en octubre 2016, se detectaron algunos picos de concentración de N-NO₃ en el agua colectada (por ej., el 29 de noviembre 2016). La ocurrencia de estos picos probablemente se pueden atribuir a una mineralización neta de N, que resultó en una acumulación de nitratos durante el período de barbecho (sin cultivo creciendo) previo a la siembra de la pastura y durante los primeros meses de implantada la misma. Por lo tanto, estos nitratos colectados en CP ya en fase de pastura no provendrían

de aplicaciones de fertilizantes, sino del N mineralizado del suelo.

A partir de abril 2017, y hasta la última fecha de colecta, se observaron importantes diferencias en las concentraciones de N-NO₃ entre ambos tratamientos, siendo los valores más elevados en CC. La alta cantidad de fertilizantes minerales aplicados durante todo este período habría favorecido la ocurrencia de una importante pérdida por lixiviación del N aplicado. Es importante destacar, que las concentraciones de N-NO₃ en muestras del tratamiento CC aumentaron drásticamente después de los eventos de fertilización (por ejemplo, las aplicaciones de 110, 140 y 93 kg/ha de N en los días 21 julio 2017, 18 agosto 2017 y 26 septiembre 2017, respectivamente) indicando un riesgo potencial de pérdida por lixiviación del N aplicado cuando la oferta de N mineral es alta en relación a la demanda del cultivo (en este caso, cebada).

Por el contrario, en el tratamiento CP, no hubieron aplicaciones de fertilizante -N desde enero 2016, la pastura en crecimiento se encontraba utilizando el N mineral del suelo, y podrían también estar ocurriendo procesos microbianos de inmovilización de N favoreciendo el incremento del N orgánico del suelo. Esto explicaría que en el tratamiento CP las concentraciones de N-NO₃ en el agua colectada fueron mínimas o despreciables, indicando que durante la fase de crecimiento de la pastura no ocurrieron pérdidas de N por lixiviación.

Es importante destacar que la pastura de este experimento no recibió pastoreo sino que fue cortada. En este sentido, Wachendorf *et al.* (2004) mostraron una

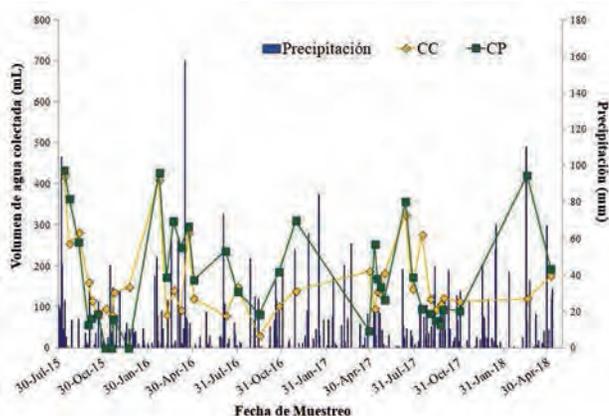


Figura 3 - Promedio de agua colectada de las copas porosas en cada muestreo en dos diferentes tratamiento (CC: cultivo continuo con fertilización; CP: 3 años de cultivos en rotación con pastura mixta de 3 años).

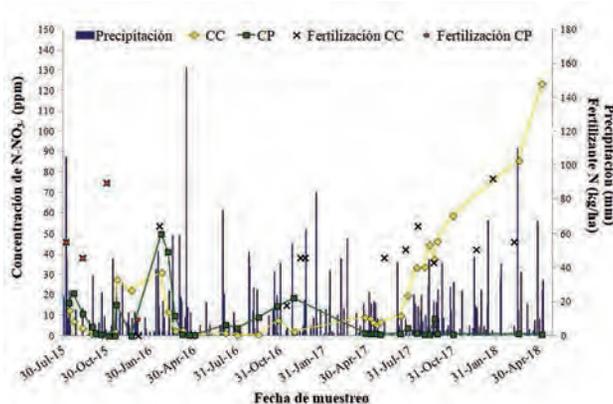


Figura 4 - Concentración promedio de nitratos (N-NO₃ en ppm), precipitación (mm por día) y cantidad de fertilizante nitrogenado (kg/ha) durante el período del ensayo en dos diferentes tratamientos (CC: cultivo continuo con fertilización; CP: 3 años de cultivos en rotación con pastura mixta de 3 años).

lixiviación de N menor en pasturas cortadas respecto a pasturas pastoreadas. De igual manera, Franzluebbbers *et al.* (2014) reportó pérdidas de N más altas en sistemas con pastoreo.

Es interesante mencionar que se obtuvo un número inferior de muestras totales en CP durante del período del ensayo. Esto se debió a que se trata de un suelo con mejor estructura y porosidad, y que en períodos secos las copas pierden el vacío, no permitiendo la entrada de agua a través de la cerámica porosa. Por otro lado, en el tratamiento CC las condiciones de uso de suelo más intensivo y de mayor densidad favorecen a que se mantenga el vacío en las copas.

CONCLUSIONES

Las copas porosas demostraron un buen funcionamiento bajo condiciones de campo y dieron estimaciones consistentes y fiables de concentraciones de $N-NO_3^-$. Las mayores concentraciones de $N-NO_3^-$ durante el período del ensayo en el sistema de cultivo continuo indican que la inclusión de pastura en la rotación minimiza las pérdidas de N por lixiviación. Esto se explica principalmente por la menor cantidad de fertilizante aplicado durante la fase pastura y por la activa utilización del N presente en el suelo por la pastura en crecimiento.

Algunas prácticas de manejo agrícola como la aplicación de dosis de fertilizante según niveles críticos y ajustadas por rendimiento, así como la aplicación fraccionada del fertilizante en momentos de mayor requerimiento, contribuirían en forma estratégica a minimizar las pérdidas de N y reducir el riesgo de contaminación por nitratos de las aguas subterráneas. Se destaca la importancia del manejo óptimo de la fertilización nitrogenada para evitar pérdidas económicas directas para el productor y para maximizar la productividad de los cultivos en campo. El efecto de acumulación de N orgánico en el suelo al fina-

lizar la pastura puede ser utilizado con una estrategia eficiente en la fase de cultivos para evitar la pérdida de N por lixiviación. La contaminación a través de la lixiviación de nitrato sigue siendo un desafío importante para la investigación y una relevante amenaza para las aguas subterráneas y ecosistemas acuáticos. En futuros estudios será necesario estimar el agua percolada para poder calcular balances de masas y el N total por hectárea que se pierde por lixiviación.

AGRADECIMIENTOS

Al equipo de apoyo del Programa de Producción y Sustentabilidad Ambiental de INIA La Estanzuela por su colaboración en el trabajo de campo: Wilfredo Mesa (Técnico agropecuario, Asistente de investigación), Emiliano Barolín (Auxiliar de investigación), Julieta Mariotta (Auxiliar de investigación). A Carolina Lizarralde (MSc, Lincoln University, Nueva Zelanda) por dar seguimiento del ensayo entre 2015-2016. Al Laboratorio de Suelos y Aguas de INIA La Estanzuela por la ejecución del análisis de muestras de agua.

REFERENCIAS

- Baumhardt RL, Lascano RJ (1996). Rain infiltration as affected by wheat residue amount and distribution in ridged tillage. *Soil Science Society of America Journal* 60:1908-13.
- Cassman K., Dobermann A, Walter D, (2002). Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *Ambio* 31: 132-140.
- Díaz Rossello R (1992) Evolucion del nitrógeno total en rotaciones con pasturas. *Rev Inia Investigaciones Agrarias* 1: 27-35.
- Ernst O, Siri-Prieto G (2009). Soil & Tillage Research Impact of perennial pasture and tillage systems on carbon input and soil quality indicators. *Soil and Tillage Research* 1-9.
- Franzluebbbers AJ, Sawchik J, Taboada MA (2014). Agronomic and environmental impacts of pasture-crop rotations in temperate North and South America. *Agriculture, ecosystems & environment* 190: 18-26.
- Norman RJ, Kurtz LT, Stevenson FJ (1987). Distribution and recovery of nitrogen-15-labeled liquid anhydrous ammonia among various soil fractions. *Soil Science Society of America Journal* 51:235-241.
- Power J, Peterson G. (1998). Nitrogen transformations, utilization and conservation as affected by fallow tillage method. *Soil and Tillage Research* 49:37-47.
- Townsend AR, Howarth RW, Bazzaz FA, Booth MS, Cleveland CC, Collinge *et al.* (2003). Human Health Effects of a Changing Global Nitrogen Cycle. *Ecosystem and Conservation Sciences Faculty Publications Paper* 9.
- Verhulst N, Carrillo-García A, Moeller C, Trethowan R, Sayre K, Govaerts B (2001). Conservation agriculture for wheat-based cropping systems under gravity irrigation: increasing resilience through improved soil quality. *Plant and Soil* 340:467-79.
- Weihermüller L, Siemens J, Deurer M, Knoblauch S, Rupp H, Göttlein A, Pütz T (2007). In situ soil water extraction: a review. *Journal of Environmental Quality* 36:1735-1748.

