

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE BIOSÓLIDOS PRODUCIDOS POR DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

AMABELIA DEL PINO ^{1*}; OMAR CASANOVA ¹; MÓNICA BARBAZÁN ¹; VICTORIA MANCASSOLA ¹; JIMENA RODRÍGUEZ ¹; LAURA ARLÓ ¹; LILIANA BORZACCONI ² & MAURICIO PASSEGGI ²

Recibido: 26-05-12

Recibido con revisiones: 05-09-12

Aceptado: 06-09-12

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue la caracterización y evaluación de los biosólidos (lodos) producidos en un reactor piloto alimentado con residuos agroindustriales. La caracterización química de los lodos y la estimación de la variabilidad de los parámetros se realizó a partir de muestras tomadas durante cinco semanas. En las muestras se determinó pH, materia seca (MS) y contenidos totales de C, N, P, K, Na, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn y Zn. Para estudiar los patrones de descomposición y liberación de nutrientes de los lodos se incubaron dos suelos de diferente textura con dosis de lodo equivalentes a 80 y 160 kg ha⁻¹ de N, comparándose con dosis iguales de N como fertilizante y un tratamiento testigo sin agregados. En el experimento de incubación se determinó la respiración del suelo y liberación de nutrientes durante 115 días. El contenido promedio de MS de los lodos fue 5,2%, el pH alcalino y las mayores concentraciones de nutrientes correspondieron a N, P y Ca. Hubo variabilidad entre muestreos, aunque los coeficientes de variación fueron menores a 20%. Los niveles de Na y micronutrientes no estuvieron en el rango considerado como riesgo para el ambiente. El agregado de lodo promovió la actividad microbiana del suelo. En el suelo limoso se perdió como CO₂ aproximadamente un tercio y en el franco arenoso un quinto del C agregado. El N del lodo se mineralizó rápidamente, llegando a niveles similares de N mineral a los suelos fertilizados. El agregado de lodo incrementó el contenido de P disponible, N mineral, Ca y Mg intercambiables, por lo tanto se concluye que fue beneficioso para la fertilidad del suelo.

Palabras clave. Biogás, lodos, liberación de nutrientes, Uruguay.

CHARACTERIZATION AND EVALUATION OF BIOSOLIDS PRODUCED BY ANAEROBIC DIGESTION OF AGROINDUSTRIAL RESIDUES

ABSTRACT

The objective of this study was to characterize and evaluate the biosolids (slurry) produced in a pilot reactor feed with agroindustrial residues. The chemical characterization of the biosolids and variability estimation were conducted on slurry samples taken during five weeks. Samples were analyzed for dry matter (DM), pH, and total contents of C, N, P, K, Na, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, and Zn. In order to study the patterns of decomposition and nutrient release of the slurry, two soils of different textures were incubated with slurry rates equivalent to 80 and 160 kg ha⁻¹ of N. They were compared with equal rates of fertilizer N and a check treatment without any addition. In the incubation experiment, soil respiration and nutrient release were determined during 115 days. The average DM content of the slurry was 5.2 %, pH was alkaline and the highest nutrient contents corresponded to N, P, and Ca. There was variability among samplings, although the variation coefficients were lower than 20 %. The Na and micronutrient levels were not within the range considered as environmental risk. The slurry addition promoted soilmicrobial activity. In the silt loam soil, approximately one third of the added C was lost as CO₂, and one fifth in the sandy loam soil. The slurry N was rapidly mineralized, reaching similar levels as in the fertilized soils. The addition of slurry increased the contents of available P, N, and exchangeable Ca and Mg, therefore it is concluded that it was beneficial for the soil fertility.

Key words. Biogas, slurry, nutrients release, Uruguay.

1- Dpto. de Suelos y Aguas. Facultad de Agronomía. UDELAR. Av. Garzón 780. CP 12900. Montevideo. Uruguay.

2- Departamento de Ingeniería de Reactores. Facultad de Ingeniería. UDELAR. Av. Julio Herrera y Reissig 565. CP 11300. Montevideo. Uruguay.

* Autor de correspondencia: amabelia@fagro.edu.uy

INTRODUCCIÓN

En Uruguay se recomienda el uso de enmiendas orgánicas para mantener o aumentar la productividad de los suelos bajo manejo intensivo. Las enmiendas más utilizadas son abonos verdes y estiércoles (del Pino *et al.*, 2008; Barbazán *et al.*, 2011). Estas enmiendas se aplican a los suelos en muchos casos sin ningún procesamiento.

El Departamento de Canelones, Uruguay concentra la mayor actividad agroindustrial del país, estimándose una generación de residuos de aproximadamente 130.000 toneladas por año, los cuales constituyen un problema para quienes los generan, ya que requieren gastos para su disposición final. Existen posibilidades de realizar manejos alternativos de los residuos agroindustriales, utilizándolos como fuente de biogás. La tecnología anaerobia permite la estabilización de los residuos, la producción de mejoradores de suelos, la obtención de energía y eventualmente la venta de créditos de carbono (Passeggi *et al.*, 2005). Los biosólidos producidos a partir de la digestión anaerobia para producción de biogás han sido ampliamente utilizados como enmiendas de suelo para mejorar propiedades físicas y aumentar la oferta de nutrientes de los mismos (Garg *et al.*, 2005; Loria *et al.*, 2007; Terhoedven-Urselmans *et al.*, 2009).

Uno de los problemas que enfrentan productores y técnicos para la utilización de materiales orgánicos, como los lodos de producción de biogás, es la heterogeneidad de los mismos. Por lo tanto no es recomendable la utilización de este tipo de enmiendas orgánicas sin una previa caracterización que permita evaluar sus aportes de nutrientes y compuestos orgánicos a los suelos y cultivos (Eghball & Power, 1999; Hartz *et al.*, 2000). Por otro lado, el desconocer la composición de este tipo de enmiendas puede llevar a la aplicación de dosis excesivas, lo que trae acompañado el riesgo de contaminación de suelos y aguas (Sharpley *et al.*, 1998).

En este marco se planteó el objetivo de caracterización de los biosólidos (lodos) provenientes de un reactor piloto alimentado con residuos agroindustriales. La estrategia de evaluación consistió en la caracterización de los lodos y la incubación en condiciones controladas de laboratorio para determinar los patrones de mineralización y la evolución de los nutrientes incorporados al suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó el biosólido proveniente de la digestión anaerobia de residuos agroindustriales. La mezcla de residuos estaba compuesta por materiales de tres orígenes diferentes. Por un lado contenido ruminal de vacunos, proveniente de un frigo-

rífico de Canelones, Uruguay. Otro de los materiales, proveniente de una curtiembre, fue grasa de descarte de cueros de vacunos. Esta grasa es retirada de los cueros previo al procesamiento, por lo tanto no recibió tratamiento químico posterior. El tercer material fue lodo biológico generado por una planta de tratamiento de residuos de producción de aceite. Los materiales se mezclaban en una proporción 4:2:1 en volumen y 2,5:1,6:1 en peso de materia seca. La digestión se realizó en un reactor piloto de 5000 litros de capacidad, alimentado diariamente con una carga de 2,9 kg de sólidos volátiles por metro cúbico de reactor. El tiempo de residencia hidráulica del digestor fue de 30 días y la temperatura de trabajo de 35 °C. Durante la operación del reactor se siguió la eliminación de sólidos volátiles y la producción de biogás, cuya composición se analizó mediante cromatografía gaseosa.

Para la caracterización del biosólido se tomaron muestras durante 5 semanas, luego de que el reactor alcanzó el estado estacionario (período setiembre-noviembre de 2010). Se analizaron dos submuestras, dentro de cada muestreo, para evaluar la homogeneidad del material.

Los patrones de mineralización de los lodos se estudiaron en incubaciones aeróbicas (25 °C y humedad a capacidad de campo) en dos suelos (Tabla 1). El suelo 1 es de textura franco limosa, proveniente de un área con muchos años de agricultura, y el suelo 2 es de textura franco arenosa, proveniente de un área bajo campo natural (de aquí en adelante se mencionan como S1 y S2).

Los tratamientos fueron: un testigo sin agregados de lodo o fertilizante; lodo en dos dosis equivalentes a 80 y 160 kg de N ha⁻¹ y fosfato de amonio (18% de N, 46% de P₂O₅) en dos dosis equivalentes a 80 y 160 kg de N ha⁻¹. Los cálculos de las dosis se realizaron asumiendo una densidad aparente del suelo de 1,25 g cm⁻³ y 15 cm de profundidad. Las dosis de N son las normalmente aplicadas a gramíneas forrajeras. Las características del lodo se presentan en la Tabla 2.

Para incorporar el lodo y el fertilizante se extendió una fina capa de suelo en una bandeja, agregando los materiales y el agua desionizada necesaria para llevar los suelos a capacidad de campo (0,25 y 0,22 g g⁻¹ para S1 y S2 respectivamente), mezclándose cuidadosamente. Los tratamientos se incubaron a 25 °C durante 115 días en bandejas de plástico, con pequeños agujeros en su tapa para permitir la entrada de aire (800 g de suelo por bandeja). Se realizaron tres repeticiones por tratamiento y por suelo. La humedad del suelo se mantuvo mediante controles semanales de peso. Cada dos semanas se tomaron muestras de suelos para determinar el contenido de N mineral, la evolución del P disponible, así como el contenido de bases del suelo.

En los lodos se determinó el contenido de materia seca (secado a 60 °C). En muestras secas y sin moler se determinó el N total según Kjeldahl. En muestras calcinadas durante 5 horas a 550 °C y diluidas con HCl se determinaron P total (Murphy y Riley 1962), así como K y Na por emisión atómica,

Tabla 1. Características de los suelos utilizados en el experimento de incubación.

Table 1. Characteristics of the soils used in the incubation experiment.

	Suelo 1 (S1)	Suelo 2 (S2)
Arena (%)	28,8	67,5
Limo (%)	58,1	18,2
Arcilla (%)	13,1	14,3
pH	5,8	6,2
C (g kg ⁻¹)	10,1	17,2
P Bray1 (mg kg ⁻¹)	64,0	2,2
Ca int. (cmolc kg ⁻¹)	6,21	11,61
Mg int. (cmolc kg ⁻¹)	1,96	1,93
K int. (cmolc kg ⁻¹)	0,75	0,24
Na int. (cmolc kg ⁻¹)	0,85	0,94

en tanto que Ca, Mg, Cu, Fe, Mn y Zn se determinaron por absorción atómica. En muestras frescas se determinaron el pH y la conductividad eléctrica con electrodos específicos.

El suelo se secó a 40 °C y se molió. El N mineral del suelo se extrajo con KCl 2M. Se determinaron N-NO₃⁻ y N-NH₄⁺ por colorimetría (Mulvaney, 1996 y Rhine *et al.*, 1998 respectivamente). El P asimilable se determinó por Bray 1 (Bray & Kurtz, 1945). Las bases intercambiables se extrajeron con acetato de amonio 1 M a pH 7, y se determinaron Ca y Mg por absorción atómica y K y Na por emisión (Isaac & Kerber, 1971). El pH se determinó por potenciometría (relación suelo:agua 1:2,5). Para la determinación de la evolución de CO₂ se colocó el suelo en frascos herméticos conteniendo un vial NaOH 0,25 M. Durante los tres primeros días de la incubación, y luego una vez por semana se estimó el C respirado. Esta estimación se realizó titulando con HCl 0,1 M el NaOH remanente, restando el CO₂ del aire atrapado en dos frascos sin suelo.

El análisis de varianza se realizó para cada suelo considerando un diseño de parcelas al azar con tres repeticiones. La comparación de los tratamientos se realizó mediante el uso de contrastes. Los contrastes planteados fueron: 1) testigo respecto a tratamientos, 2) lodos respecto a fertilizantes, 3) dosis baja de lodos respecto a dosis alta, 4) dosis baja de fertilizantes respecto a dosis alta.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Digestión de residuos

El digestor fue operado durante 146 días, alcanzando un funcionamiento a partir de la octava semana. La eficiencia de reducción de sólidos volátiles resultó del 47% y la producción diaria de biogás 1,58 m³ por metro cúbico de digestor. La composición del biogás medida por cromatografía gaseosa resultó 65% CH₄ y 35% CO₂.

Tabla 2. Composición de los biosólidos utilizados en el experimento de incubación.

Table 2. Composition of the biosolids used in the incubation experiment.

Parámetro	
MS (%)	4,4
C (%)	33
N (%)	2,0
P (%)	0,64
K (%)	0,20
Na (%)	0,57
Ca (%)	3,92
Mg (%)	0,87
Fe (mg kg ⁻¹)	2508
Mn (mg kg ⁻¹)	158
Zn (mg kg ⁻¹)	94
Cu (mg kg ⁻¹)	26
pH	7,46
CE (μs cm ⁻¹)	5,3

Caracterización de lodos

El contenido de MS de los lodos presentó diferencias entre los muestreos, aunque se destaca la baja concentración en todos los casos, estando los promedios en el entorno del 5% de sólidos (Tabla 3). Las varianzas entre repeticiones en cada fecha de muestreo fueron 0,029 para

Tabla 3. Contenido de materia seca (MS), pH y contenido de nutrientes en biosólidos retirados del reactor en cinco fechas diferentes (base seca). Promedio, desvío estándar (D. est.) y coeficiente de variación (CV %).

Table 3. Dry matter (MS), pH, and nutrient contents in biosolids taken from the reactor at five different dates (dry basis). Average, standard deviation (D. est.) and coefficient of variation (CV %).

	Promedio	D. est.	CV (%)
MS (%)	5,2	1,0	18
pH	7,48	0,35	5
C (%)	39,1	3,0	8
N (%)	2,1	0,3	12
C/N	18,6		
P (%)	0,65	0,11	17
N/P	3,2		
K (%)	0,23	0,12	51
Na (%)	0,31	0,15	47
Ca (%)	3,50	0,27	8
Mg (%)	0,69	0,14	21
Fe (mg kg ⁻¹)	2345	181	8
Mn (mg kg ⁻¹)	147	12	8
Zn (mg kg ⁻¹)	97	20	21
Cu (mg kg ⁻¹)	37	12	32

N y 0,003 para P, mientras que entre fechas de muestreo los valores correspondieron a 0,061 para N y 0,011 para P. A partir de la escasa dispersión de los resultados de cada muestreo, puede concluirse que si bien se trata de un material heterogéneo, sus partículas son relativamente pequeñas, por lo tanto mediante el mezclado puede lograrse una buena homogenización. En cuanto a la variabilidad entre muestreos podría sugerirse la determinación del contenido de sólidos en los materiales, que es un análisis sencillo, previo a su utilización.

El pH de los lodos fue levemente alcalino. Los contenidos de N y P promedio fueron mayores a los de la mayor parte de los materiales orgánicos utilizados como enmiendas en Uruguay, estando sus valores cercanos a los del estiércol de ave (Barbazán *et al.*, 2011). Las bajas relaciones C/N y N/P indican que se trata de materiales que al descomponerse producirán la liberación de estos nutrientes.

El alto contenido de Ca probablemente se relaciona con el tipo de materiales utilizados. El contenido de cationes monovalentes presentó mayor dispersión que el de cationes divalentes. En el caso de K, macronutriente esencial, el aporte de los lodos es bajo, lo que debe tenerse en cuenta para la aplicación de este tipo de lodos a los cultivos. En lo referente al Na, el cual puede ser nocivo para la agregación de los coloides del suelo, el valor promedio de los lodos no parece una amenaza, aunque probablemente los valores extremos del rango puedan resultar excesivos en aplicaciones de dosis altas. En la dosis alta de lodo del experimento se agregó el equivalente a 25 kg ha^{-1} de Na, (aproximadamente $0,05 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de suelo). Si bien esta dosis no puede considerarse excesiva, podría llegar a serlo si se repitieran frecuentemente aplicaciones sobre la misma área. Los valores de Fe y Mn encontrados son algo menores a los promedios citados por Barbazán *et al.* (2011), en su trabajo de caracterización de materiales orgánicos utilizados como enmiendas de suelo en Uruguay. Los niveles de Zn y Cu, en cambio están por encima de los promedios. En términos generales los valores de micronutrientes de los lodos no difieren de los rangos obtenidos por Barbazán *et al.* (2011) en materiales basados en estiércol de ave, enmiendas ampliamente usadas en el país. Los contenidos de Cu y Zn (potencialmente contaminantes) están en consonancia o son menores a los citados por Nicholson *et al.* (1999) en una amplia revisión de materiales de origen animal en el Reino Unido.

Un aspecto importante a tener en cuenta con vistas a la aplicación de los lodos como enmienda de suelos, es la

mayor dispersión observada en los contenidos de nutrientes de los diferentes muestreos cuando se expresan los resultados en base fresca (los rangos para los macronutrientes fueron $0,68 - 1,50 \text{ g L}^{-1}$ de N; $0,25 - 0,43 \text{ g L}^{-1}$ de P y $0,04 - 0,14 \text{ g L}^{-1}$ de K). Este hecho reafirma la necesidad de caracterizar los efluentes previo a la incorporación al suelo. El conocer la concentración de nutrientes del efluente a aplicar permitirá calcular la dosis de forma más precisa, evitando usar dosis menores a las requeridas, o excesivas, con el consiguiente daño ambiental. Además sería necesario en este caso hacer una caracterización microbiológica de los materiales para asegurar su inocuidad, que no fue contemplada en nuestro estudio.

Experimento de incubación

La Figura 1 muestra la evolución del C respirado por los suelos con agregado de lodo y testigo. En cada suelo las tasas de respiración de los tratamientos con lodo fueron significativamente mayores a los testigos. La adición de lodo, con su carga de nutrientes y materia orgánica (MO) fomentó la actividad microbiana de los suelos. También es posible que el alto pH del lodo haya promovido la actividad microbiana. La tasa de respiración fue mayor en S2 que en S1 en cada uno de los tratamientos. Esto fue probablemente debido al mayor contenido de MO lábil en el suelo bajo campo natural (S2), en tanto que el área con agricultura (S1) habría perdido esta fracción, conservándose el pool más estable. Las tasas de respiración de los suelos con agregado de fertilizante fueron semejantes o menores a las de los testigos. El promedio de CO_2 respirado correspondió a 3,1; 3,4 y 2,9 $\text{mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ para testigo, fertilizante bajo y fertilizante alto respectivamente en S1. En S2 los valores fueron 7,7; 7,9 y 8,1 $\text{mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ para testigo, fertilizante bajo y fertilizante alto respectivamente. Estos resultados indican que, a diferencia de los materiales orgánicos, el agregado de fertilizantes no produjo cambios en la biomasa microbiana.

Las tasas de respiración descendieron con el tiempo. En los testigos esto se debe principalmente a la perturbación inicial del suelo, la cual promueve la actividad de los microorganismos al exponer MO a su ataque, efecto que se va perdiendo con el tiempo. En los suelos con agregado de lodo el descenso se explica por el consumo de las fracciones más lábiles de los materiales orgánicos, quedando como residuos compuestos cada vez más estables y por lo tanto difícilmente mineralizables. Este hecho sugiere que aplicaciones sucesivas de estos materiales podrían produ-

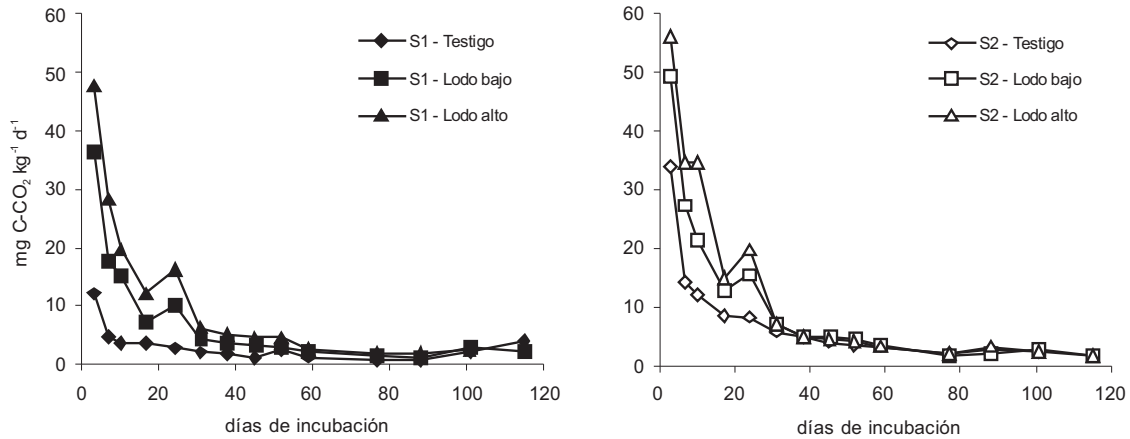


Figura 1. Tasas de evolución de C-CO₂ durante 115 días de incubación en dos suelos con agregado de biosólido en dos dosis y testigo sin agregados.
 Figure 1. Rates of CO₂-C evolution during 115 days of incubation in two soils with addition of biosolid at two rates, and a check without amendments.

cir aportes significativos de MO al suelo. Este tipo de curva de evolución de CO₂ ha sido frecuentemente observada en evaluaciones de materiales orgánicos (Dao & Cavigelli, 2003). Estos autores compararon el agregado de estiércol de vaca apilado o compostado en dos suelos de EEUU. Resulta interesante el hecho de que, en coincidencia con nuestro trabajo Dao & Cavigelli (2003) reportaron diferentes patrones de mineralización en los dos suelos. A partir de estos datos se calculó el C evolucionado como proporción del C agregado con el lodo. Se encontró una pérdida de alrededor de un tercio del C agregado en S1 (37,3% en la dosis baja y 31,0% en la dosis alta) en tanto que en S2 se perdió una menor proporción (22,7% en la dosis baja y 18,8% en la dosis alta). La mayor parte del C se perdió

en las primeras cuatro semanas. En coincidencia, un aumento de la respiración de los suelos por agregado de lodo de digestor fue reportado por Terhoeven-Urselmans *et al.* (2009) en un experimento de campo en Alemania. Esta emisión representaba aproximadamente el 27% del C agregado con el lodo.

En los dos suelos se observaron situaciones diferentes en cuanto a las formas de N mineral luego de dos semanas de incubación (Fig. 2). Mientras en S1 el NH₄⁺ se nitrificó prácticamente en su totalidad, en S2 se determinaron cantidades apreciables, sugiriendo que hubo menor actividad de los microorganismos nitrificadores. En el muestreo realizado a los 60 días de incubación, en cambio, la proporción de N-NH₄⁺ en los tratamientos con agregado de

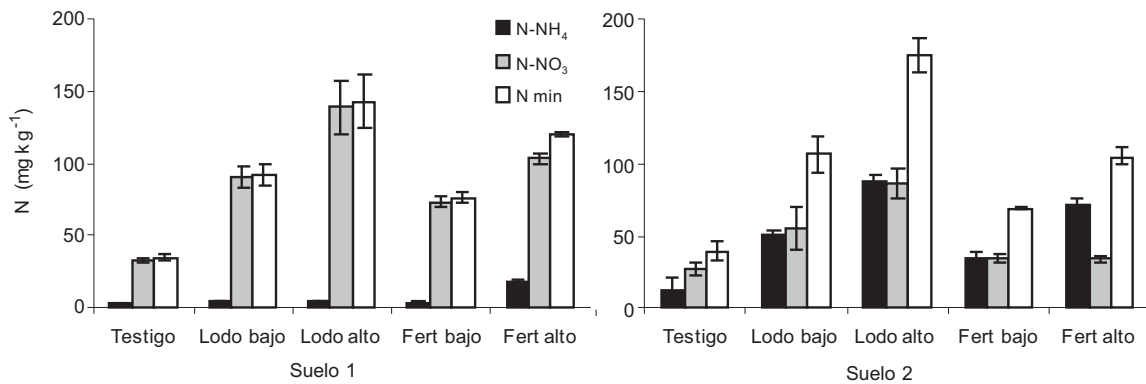


Figura 2. Contenido de N mineral luego de 14 días de incubación en los dos suelos con agregado de biosólido y fertilizante en dos dosis y testigo sin agregados.
 Figure 2. Mineral N content after 14 days of incubation in two soils with biosolid application at two rates, and a check without amendments.

lodos era notablemente minoritaria y similar para los dos suelos (4% para S1 y 5% para S2, datos no presentados). En un experimento de incubación de materiales derivados de efluentes de producción de cerdos, Loria & Sawyer (2005) reportaron una rápida nitrificación, siendo mínimas las cantidades de NH_4^+ presentes a los 28 días de incubación.

El contenido de N mineral en los suelos con agregado de lodo y fertilizante fue mayor a los testigos, siendo remarcables los efectos de las dosis en ambos casos ($p < 0,05$). Los suelos mostraron diferencias en la concentración total de N mineral para los mismos tratamientos, lo que puede deberse a los procesos de inmovilización y pérdidas, que inciden en el balance de N. Es probable que en S2 los residuos del campo natural, pobres en N, hayan promovido la inmovilización de N del fertilizante, en cambio con el lodo se produjera un efecto «priming» con mineralización de la MO lábil del suelo (Fontaine *et al.*, 2003).

Las altas concentraciones de N mineral observadas en los suelos con agregados de lodo y fertilizante pueden representar un riesgo ambiental, ya que se fomentan las pérdidas, por lixiviación y escurrimiento, lo cual significa un problema para la calidad de las aguas superficiales y subsuperficiales, o pérdidas gaseosas contaminantes del aire (Sharpley *et al.*, 1998; Calderón *et al.*, 2004). En este aspecto el lodo no se comportó como una fuente orgánica de lenta liberación de N, sino que su potencial de producir N mineral fue similar al de la fuente química. Por lo tanto sería aconsejable realizar ajustes de las dosis de N, y sincronizar el uso de los lodos con las necesidades de este nutriente, a fin de evitar efectos contaminantes por su exceso (Dao & Cavigelli, 2003; Loria *et al.*, 2007). Las características del cultivo receptor del lodo representan un aspecto relevante, siendo conveniente la aplicación en cultivos perennes, o previo a la instalación de cultivos anuales de rápido crecimiento.

El agregado de lodo y fertilizante produjo aumentos en el P disponible en ambos suelos (Tabla 4), siendo mayor el efecto producido por el agregado de fertilizante. En S2 se observó un efecto significativo de la dosis, tanto de lodo como de fertilizante, lo que no ocurrió en S1. En S1 el aumento del P disponible por agregado de lodo y fertilizante no tiene relevancia desde el punto de vista productivo, ya que se trata de un suelo de alta disponibilidad en este nutriente. En cambio en S2, por tratarse de un suelo pobre en P, los aumentos en P disponible permitirían remover esta limitante para la producción, llegando con la dosis alta de

lodo a los niveles críticos de ese nutriente para varios cultivos extensivos y pasturas. Como se mencionó respecto al N, en este caso, dosis excesivas, combinadas con erosión pueden constituir una fuente de contaminación de aguas con P, lo que debe ser controlado mediante la dosis y forma de aplicación (Dao & Cavigelli, 2003).

Al final del experimento (Tabla 4) el agregado de lodo no afectó el pH en S1, en tanto que en S2 los tratamientos con lodos mostraron menores valores que el testigo. En cambio, el agregado del fertilizante amoniacal produjo acidificación en ambos suelos.

El K no presentó variaciones significativas, salvo un aumento en la dosis alta de lodos en S1 ($P < 0,05$). En cambio el Na, Ca y Mg aumentaron significativamente en los tratamientos con lodo en S1, mostrando tendencias similares en S2, aunque sin diferencias significativas. Estos resultados reflejan un aporte extra de nutrientes, que si bien es de menor importancia que el aporte de N y P, puede llegar a ser importante en suelos de baja fertilidad o con aplicaciones reiteradas de lodos.

CONCLUSIÓN

La caracterización del lodo realizada en nuestro estudio muestra un material relativamente heterogéneo en contenido de sólidos y composición, lo que hace recomendable su caracterización si se desea utilizarlo como enmienda de suelos.

Los principales aportes de nutrientes fueron de N, P y Ca, no detectándose concentraciones de Na, o micronutrientes por encima de los valores que puedan representar amenazas para el ambiente o el suelo, siempre que se utilicen dosis en el rango de las aplicadas en este estudio.

La adición de lodo aumentó la actividad microbiana en los dos suelos estudiados. Esta rápida descomposición implicó que el lodo liberó importantes cantidades de nutrientes al suelo.

Los resultados de este estudio permiten concluir que la alternativa de uso de lodos del reactor para su aplicación al suelo será beneficiosa para la productividad del mismo. Debe evitarse la aplicación en cantidades excesivas en relación a los requerimientos de los cultivos que se realicen, a fin de evitar contaminación por exceso de nutrientes en aguas subterráneas o cursos de agua cercanos, o problemas de propiedades físicas asociados a excesos de Na.

Tabla 4. pH, contenido de bases intercambiables (K, Na, Ca, Mg) y P disponible en los dos suelos luego de 115 días de incubación con agregado de biosólido y fertilizante en dos dosis y testigos sin agregados.

Table 4. pH, content of exchangeable bases (K, Na, Ca, Mg) and available P in two soils after 115 days of incubation with biosolid and fertilizer applications at two rates, and the check without amendments.

	pH agua	K int.	Na int.	Ca int.	Mg int.	P Bray 1
		cmol _c kg ⁻¹				mg kg ⁻¹
Suelo 1						
Testigo	5,83	0,79	0,52	6,06	1,90	69,2
Lodo bajo	5,83	0,76	0,62	6,68	2,13	76,1
Lodo alto	5,88	0,83	0,67	6,88	2,24	80,7
Fert bajo	5,58	0,79	0,59	6,08	1,91	83,1
Fert alto	5,27	0,79	0,50	5,83	1,95	84,9
Suelo 2						
Testigo	6,17	0,29	0,45	11,51	2,06	1,2
Lodo bajo	6,03	0,27	0,65	12,25	2,26	8,0
Lodo alto	5,93	0,35	0,95	13,82	2,60	15,5
Fert bajo	5,85	0,27	0,70	13,00	2,27	17,6
Fert alto	5,46	0,33	0,65	12,63	2,30	35,2
Contrastes Suelo 1						
				Probabilidad		
testigo vs. tratamientos	<0,01	0,88	0,29	0,04	<0,01	<0,01
lodos vs. fertilizantes	<0,01	0,83	0,03	<0,01	<0,01	<0,01
dosis lodos	0,28	0,05	0,62	0,19	0,03	0,10
dosis fertilizante	<0,01	0,92	0,34	0,14	0,34	0,48
Contrastes Suelo 2						
				Probabilidad		
testigo vs. tratamientos	<0,01	0,70	0,02	0,03	0,01	<0,01
lodos vs. fertilizantes	<0,01	0,82	0,24	0,69	0,13	<0,01
dosis lodos	<0,01	0,16	0,06	0,05	0,02	<0,01
dosis fertilizante	<0,01	0,37	0,81	0,65	0,79	<0,01

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue realizado en el marco del Proyecto FPTA 279 financiado por INIA, Uruguay.

BIBLIOGRAFÍA

- Barbazán, M; A del Pino; C Moltini; J Hernández; J Rodríguez. 2011. Caracterización de materiales orgánicos aplicados en sistemas agrícolas intensivos de Uruguay. *Agrociencia* 15: 82-92.
- Bray, RH & LT Kurtz. 1945. Determinations of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59: 39-45.
- Calderón, FJ; GW McCarty; JAS Van Kessel & JB Reeves III. 2004. Carbon and nitrogen dynamics during incubation of manured soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1592-1599.
- Dao, TH & MA Cavigelli. 2003. Mineralizable carbon, nitrogen, and water extractable phosphorus release from stockpiled and composted manure and manure amended soils. *Agron. J.* 95: 405-413.
- del Pino, A; C Repetto; C Mori & C Perdomo. 2008. Patrones de descomposición de estiércoles en el suelo. *Terra Latioamericana* 26: 43-52.
- Eghball, B & JF Power. 1999. Phosphorus and nitrogen based manure and compost applications: corn production and soil phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 895-901.
- Fontaine, S; A Mariotti & L Abbadie. 2003. The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? *Soil Biol. Biochem.* 35: 837-843.
- Garg, RN; H Pathak; DK Das & RK Tomar. 2005. Use of flyash and biogas slurry for improving wheat yield and physical properties of soil. *Environ. Monit. Assess.* 107: 1-9.
- Hartz, TK; JP Mitchell & C Giannini. 2000. Nitrogen and carbon mineralization dynamics of manures and composts. *Hortic. Sci.* 35: 209-212.
- Isaac RA & JD Kerber. 1971 Atomic absorption and flame photometry techniques and uses in soil, plant and water analysis. *In: Instrumental Methods for Analysis of Soil and Plant Tissues.* Madison: Soil. Sci. Soc. Am. Pp. 17-37.

- Loria, ER & JE Sawyer. 2005. Extractable soil phosphorus and inorganic nitrogen following application of raw and anaerobically digested swine manure. *Agron. J.* 97: 879-885.
- Loria, ER; JE Sawyer; DW Barker; JP Lundvall & JC Lorimor. 2007. Use of anaerobically digested swine manure as a nitrogen source in corn production. *Agron. J.* 99: 1119-1129.
- Mulvaney, RL. 1996. Nitrogen-inorganic forms. *In: DL Sparks et al. (eds.) Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. ASA and SSSA, Madison WI.* Pp 1123-1184.
- Murphy, J & JP Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Act.* 27: 31-36.
- Nicholson, FA; BJ Chambers; JR Williams; RJ Unwin. 1999. Heavy metal contents of livestock feeds and animal manures in England and Wales. *Bioresource Technol.* 70: 23-31.
- Passeggi, M; I. López & L. Borzacconi. 2005. Assessment of the energy production from biogas in Uruguay. II Congreso de Ingeniería Química del Mercosur y IV Congreso del MERCOSUR de Ingeniería de Procesos, Brazil.
- Rhine, ED; GH Sims; RL Mulvaney & EJ Pratt. 1998. Improving the Berthelot reaction for determining ammonium in soil extracts and water. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 473-480.
- Sharpley AN; JJ Meisinger; A Breeuwsma; JT Sims; TC Daniel & JS Schepers. 1998. Impacts of animal manure management on ground and surface water quality. *In: J.L. Hatfield and B.A. Stewart (eds.), Animal waste utilization: effective use of manure as a soil resource.* Chelsea: *Ann. Arbor. Press.* Pp. 173-242.
- Terhoedven-Urselmans, T; E Scheller; M Raubuch; B Ludwig & R Georg Joergensen. 2009. CO₂ evolution and N mineralization after biogas slurry application in the field and its yield effects on spring barley. *Appl. Soil Ecol.* 42: 297-302.