

## Migración de compuestos nitrogenados de lodos del tratamiento de aguas residuales aplicados en columnas de suelo

Miguel Angel Orduña Bustamante  
Ana Elisa Silva Martínez  
Pedro Martínez Pereda

Universidad Nacional Autónoma de México  
Programa de Posgrado en Ingeniería  
Sección de Ingeniería Ambiental  
[anasvega@servidor.unam.mx](mailto:anasvega@servidor.unam.mx)

### Resumen

Este trabajo se realizó con el fin de cuantificar la migración de los compuestos nitrogenados contenidos en los lodos de desecho de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales al aplicarlos en columnas de suelo sembradas con un cultivo de avena (*Avena sativa* var. Toluca). Para ello se montó un experimento en el que se emplearon como tratamientos lodos crudos y lodos digeridos por vía aerobia, así como una solución nutritiva como testigo, estos tres tratamientos se aplicaron sobre tres mezclas de suelo preparadas con diferentes proporciones de un suelo aluvial del Valle de México y arena para construcción.

Se determinó el contenido de nitrógeno amoniacal, nitratos y nitritos en los lodos y la solución aplicados a los suelos, así como en los lixiviados obtenidos después de la aplicación de los tratamientos en los tres suelos empleados. También se determinaron algunas de las propiedades fisico-químicas de los suelos con el fin de tener idea de las condiciones dentro de las columnas de suelo.

Se concluyó que la forma química en la que se aplica el nitrógeno es el principal factor que interviene en la lixiviación de este elemento y que el nitrato es la forma más susceptible a este fenómeno, debido a que tiene una carga eléctrica negativa que limita su adsorción en la superficie de intercambio de la arcilla que tiene cargas predominantemente negativas.

El tipo de suelo no fue un factor importante en la lixiviación de nitrógeno cuando se aplicaron lodos crudos o digeridos, sin embargo, el contenido de arcilla sí mostró un efecto sensible al reducir la lixiviación del nitrógeno cuando no hubo aporte de materia orgánica, es decir, para el tratamiento con solución nutritiva. El aporte de materia orgánica de los lodos aumentó la capacidad de adsorción de nitrógeno amoniacal y de nitratos para el suelo de textura más gruesa (arena migajosa).

El cultivo de avena (*Avena sativa* var. Toluca) mostró una mejor respuesta a la aplicación de lodo digerido por vía aerobia comparado con la aplicación de lodo crudo, aunque tuvo su mayor crecimiento cuando se le aplicó la solución nutritiva.

El empleo de lodos en cultivos agrícolas como forma de disposición final debe hacerse de manera cuidadosa para evitar la aplicación excesiva de nitrógeno en forma de nitratos en el caso de emplear lodos digeridos por vía aerobia, pero también deben cuidarse otros aspectos como el contenido de patógenos y de metales, así como evitar el uso de lodos crudos que tienen un alto contenido de materia putrescible que al descomponerse genera malos olores atrayendo fauna nociva, constituyéndose así en un factor de riesgo para la salud de la población vecina al sitio de aplicación.

## Introducción

El tratamiento y disposición final de los lodos de desecho de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales son problemas que requieren soluciones económicamente viables, pero que al mismo tiempo tengan el menor impacto adverso sobre el medio ambiente natural y sobre la salud humana. En los últimos tiempos se han desarrollado técnicas para reducir el volumen y la putrescibilidad de los lodos, como paso previo a su disposición final en lechos de secado, rellenos sanitarios, incineración o bien para su aplicación en suelos agrícolas y forestales o en suelos degradados por la erosión o por eventos de contaminación ocasionados por actividades humanas, como la acumulación de desechos de la minería y de la industria.

Las diferentes técnicas para la disposición final de los lodos tienen ventajas y desventajas que dependen de las condiciones particulares de cada proyecto. Sin embargo, la posibilidad de aprovechar los nutrientes y el poder acondicionador de suelos que presentan estos lodos, ha ocasionado que en diferentes países del mundo se realicen investigaciones y se emitan reglamentos encaminados a aprovechar estas propiedades de los lodos. Al mismo tiempo, existe la preocupación de que los cuerpos de agua subterránea sean contaminados debido a la migración de sustancias a través del suelo, en particular la migración de los nitratos, que pueden ocasionar problemas de salud entre la población que se abastece a partir de estos depósitos de agua. Como ejemplos se tienen la parte 503 del Código Federal de Regulaciones de la Agencia de Protección del Ambiente de Estados Unidos (USEPA por sus siglas en inglés), y la directiva 86/278/CEE de la Comunidad Económica Europea, en las que se establecen limitaciones para el uso de estos lodos en suelos agrícolas y forestales, y suelos en recuperación.

La Comisión Nacional del Agua en México, contabilizó 1000 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en funcionamiento para el año 1999, con un gasto de operación total de 42,397 Ls<sup>-1</sup>, sin embargo, en gran parte de estas plantas no se cuenta con sistemas para el tratamiento de lodos y estos se vierten en forma cruda a los cuerpos receptores, de manera que el problema de contaminación de estos cuerpos de agua solo se resuelve de manera parcial (CNA, 1999).

Los efectos de la aplicación de lodos en terrenos agrícolas, como forma de disposición final de estos materiales, se ha reportado en varios trabajos como el de Muñoz Gant y colaboradores, 1999, quienes aplicaron diferentes dosis de lodos de una planta de tratamiento de agua residual municipal en un suelo agrícola del Valle del Guadalquivir, encontrando que la densidad aparente del suelo disminuyó cuando la dosis de lodo aplicada fue mayor (80 TonHa<sup>-1</sup>), aunque estadísticamente no fue significativo. En cuanto a la retención de humedad encontraron que la dosis más alta de lodos condujo a la retención de un mayor volumen de agua, lo que atribuyeron al incremento de microporos por la materia orgánica aplicada. La conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ), disminuyó a medida que se incrementó la dosis de lodo, aunque el cambio más importante se presentó entre el testigo y el tratamiento con 40 TonHa<sup>-1</sup>, sin embargo, en este caso tampoco se encontraron diferencias estadísticamente significativas.

Palacios y colaboradores, 1999, trabajaron en un cultivo de plátano aplicando agua de cinco calidades diferentes, preparadas a partir de mezclas de agua blanca (AB), efluente secundario (ES) y efluente secundario desalinizado de una planta de tratamiento de agua residual municipal en las Islas Canarias. La conductividad hidráulica se redujo en todos los casos, pero sin llegar a niveles críticos para el cultivo, la producción fue mayor en el tratamiento con efluente secundario (ES) y la conductividad eléctrica, que era el factor de mayor preocupación debido a la susceptibilidad del cultivo a las altas concentraciones de sales en el agua de riego, no superó en ningún caso el nivel crítico en el que se reduce la producción del cultivo ( $0.5 \text{ dSm}^{-1}$ ).

Otros resultados de investigaciones relacionadas con la aplicación de lodos en suelos agrícolas y forestales, están incluidos en una revisión realizada por Krogman y colaboradores, 1997. Esta revisión menciona los trabajos de Shepherd, 1996, y de Misselbroock y colaboradores, 1996, quienes aplicaron lodos crudos y digeridos aerobiamente, con dos técnicas de aplicación, una en superficie y la otra en inyección; ellos encontraron mayor lixiviación de nitratos en la aplicación de lodos digeridos en comparación con los lodos crudos, y que el método de aplicación en la superficie produjo menos lixiviados que la inyección.

Krogman y colaboradores, 1996, citan también el trabajo de Chen y colaboradores, 1996, en el que se compara la aplicación de biosólidos con la aplicación de estiércol bovino en pasto Ray Grass, y reporta que el estiércol liberó nitrógeno durante toda la fase experimental (84 días), mientras que los biosólidos solo liberaron nitrógeno durante las dos primeras cosechas.

En otros trabajos reportados por Krogman y colaboradores, 1997, se muestran incrementos en el contenido de nitrógeno, fósforo, cobre y zinc, así como el aumento en la salinidad y contenido de materia orgánica del suelo. En cuanto a las propiedades físicas del suelo, menciona el trabajo de Abdusharar, 1996, quien encontró que la aplicación de biosólidos mejora la tasa de infiltración y la estabilidad estructural del suelo, atribuyéndolo al incremento en la salinidad y contenido de materia orgánica.

En la DEPMI, Muñoz Nava, 1997, realizó un trabajo sobre la lixiviación de aluminio en lechos de secado de lodos procedentes de un tratamiento primario avanzado con sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), en suelo del ex-lago de Texcoco. Él concluyó que es factible esta forma de disposición de lodos en esa zona, ya que el elevado pH de los suelos inmoviliza a las especies y complejos de aluminio. También advierte que, por su composición, estos lodos después de su estabilización con cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) pueden emplearse para su aplicación a suelos agrícolas de acuerdo con las restricciones que establecen la Comunidad Económica Europea y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (los reglamentos de ambos organismos no restringen la aplicación de lodos por su contenido de aluminio), esta forma de disposición está limitada por la toxicidad del aluminio sobre cultivos agrícolas y forestales (la concentración de aluminio en los lixiviados tuvo un promedio de  $151.1 \text{ mgL}^{-1}$ ), aunque la disponibilidad de este metal también depende de las condiciones de pH del suelo donde se aplique.

## **Materiales y Métodos**

El experimento se montó en un diseño en bloques al azar en el que se probaron tres tratamientos: lodo crudo, lodo digerido y solución nutritiva. Estos tres tratamientos se probaron en tres tipos de suelo o bloques. Los tipos de suelo fueron: migajón arcillo-arenoso, arena migajosa y migajón arenoso. Esto da un total de nueve unidades experimentales.

Para la construcción de las columnas se emplearon secciones de tubo de PVC de 55 cm de longitud y 10.5 cm (4.5 pulgadas) de diámetro colocado verticalmente y tapado por la parte inferior. El contenedor tenía una salida en la parte inferior con una manguera para coleccionar el lixiviado.

Las columnas se empacaron con una capa de grava de 10 cm de espesor en la parte baja; a continuación se colocó una columna de 30 cm de suelo comprimiéndolo a medida que se introdujo; finalmente se dejó un espacio libre de 15 cm sobre el suelo con el objeto de que hubiera lugar suficiente para agregar el lodo o solución nutritiva.

La alimentación del lodo se realizó semanalmente adicionando 1 L de lodo o solución nutritiva según el caso una vez por semana por la parte superior de la columna. Durante el experimento se aplicaron riegos para mantener la humedad del suelo en un nivel adecuado para el crecimiento del cultivo, como no se contó con un dispositivo para determinar dicha humedad, la necesidad del riego se determinó de manera visual.

Tres de las columnas (una por cada tipo de suelo) se alimentaron con una solución de  $412.5 \text{ mgL}^{-1}$  de nitrato de amonio (nitrato:  $72.2 \text{ mg-NL}^{-1}$ ; amonio:  $72.2 \text{ mg-NL}^{-1}$ ) y  $475 \text{ mgL}^{-1}$  de nitrato de potasio ( $65.8 \text{ mg-NL}^{-1}$ ). Otras tres columnas se alimentaron con lodo crudo procedente del sedimentador secundario del sistema de lodos activados de la planta de tratamiento de aguas residuales municipales de Ciudad Universitaria. Y tres columnas más se alimentaron con lodo digerido, que se preparó en un reactor aerobio de flujo continuo alimentado con lodo crudo de la misma planta de tratamiento con un tiempo de retención de quince días. Las concentraciones de nitrógeno en los tratamientos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Contenido de nitrógeno en los lodos y solución empleados como tratamientos.

Tratamiento	Concentración de nitrógeno en los tratamientos ( $\text{mg-NL}^{-1}$ )			
	Amoniacal	Nitratos	Nitritos	Total
Lodo crudo*	30.3	1.1	0.2	31.6
Lodo digerido*	11.3	69.3	0.1	80.7
Solución nutritiva	72.2	178.0	0	250.2

\* promedio de todas las aplicaciones

En la salida inferior del contenedor se colocó un recipiente de vidrio de 1 L de capacidad para coleccionar el lixiviado. Una muestra de este lixiviado se analizó para medir la cantidad de compuestos nitrogenados que salen de la columna.

En cada columna se sembró avena (*Avena sativa* var. Toluca), a los 15 días después de la siembra se tomó una muestra para determinar la biomasa y se hizo un aclareo para dejar 20 plantas en cada columna.

Los parámetros que se determinaron para medir el efecto de los tratamientos fueron la concentración de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). Estas determinaciones se hicieron en el lodo aplicado y en el lixiviado.

Como parámetros de calidad se determinaron la textura, porosidad, conductividad hidráulica y pH del suelo, altura y biomasa del vegetal y pH en el lodo aplicado y en el lixiviado.

## Resultados

La determinación de la textura de los tres tipos de suelo empleados en el experimento los ubica dentro de tres clases que son migajón arcillo-arenoso, arena migajosa y migajón arenoso. Los tres suelos son de textura gruesa por su alto contenido de arena (tabla 2) pero el migajón arcillo-arenoso mostró un alto contenido de partículas finas, 51.1% entre arcilla y limo, mientras que en los otros dos suelos predominan las partículas de arena.

Al determinar la porosidad en los tres tipos de suelo en evaluación, antes de la siembra, se encontró un valor elevado para el suelo migajón arcillo-arenoso y porosidades intermedias para la arena migajosa y el migajón arenoso como se muestra en la tabla 3.

Tabla 2. Resultados del análisis de textura en los tres suelos empleados en el experimento.

Suelo	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Clase textural
1	48.9	27.8	23.3	Migajón arcillo-arenoso
2	79.5	8.4	12.1	Arena migajosa
3	72.1	13.6	14.3	Migajón arenoso

Estos resultados muestran que el volumen poroso del migajón arcillo-arenoso es mayor que para la arena migajosa y el migajón arenoso, debido a su mayor contenido de arcilla. En el migajón arenoso se obtuvo un valor medio de porosidad acercándose a valores para suelos arenosos.

Tabla 3. Características fisico-químicas del suelo.

Tipo de suelo	Porosidad	Conductividad hidráulica (ms <sup>-1</sup> )		pH	Capacidad de intercambio catiónico (meq*100g <sup>-1</sup> )
		Inicial	Final		
Migajón arcillo-arenoso	0.59	4.98x10 <sup>-5</sup>	1.36x10 <sup>-3</sup>	7.1	22.2
Arena migajosa	0.37	2.73x10 <sup>-4</sup>	7.69x10 <sup>-4</sup>	7.6	6.7
Migajón arenoso	0.44	1.15x10 <sup>-4</sup>	7.84x10 <sup>-4</sup>	7.2	10.7

Con respecto a la conductividad hidráulica inicial y final se observó un incremento de 27.3 veces en el suelo migajón arcillo-arenoso, mientras que en los otros dos suelos el incremento fue de 2.8 veces en la arena migajosa y de 5.3 veces para el migajón arenoso, de manera que el cambio no fue tan marcado. El incremento en conductividad hidráulica del suelo migajón arcillo-arenoso se puede asociar con la formación de pequeños tubos alrededor de las raíces de la planta que incrementaron la velocidad de flujo del agua a través de la columna; otro factor que muy probablemente contribuyó a este incremento de conductividad es que debido a los cambios de humedad en el suelo que se presentaron durante el período experimental y a que este suelo presentó un comportamiento expansivo, característico de arcillas del tipo montmorillonita, la columna de suelo se separó físicamente del tubo de PVC lo cual incrementó el efecto de pared ocasionando así una mayor velocidad en el flujo del agua.

El pH del suelo tiene importancia en el proceso de volatilización del amonio, ya que en soluciones con valores altos de pH (pKa=9.26, Sawyer, 1994) la mayor parte se presenta como amoniaco que es la forma gaseosa de este compuesto.

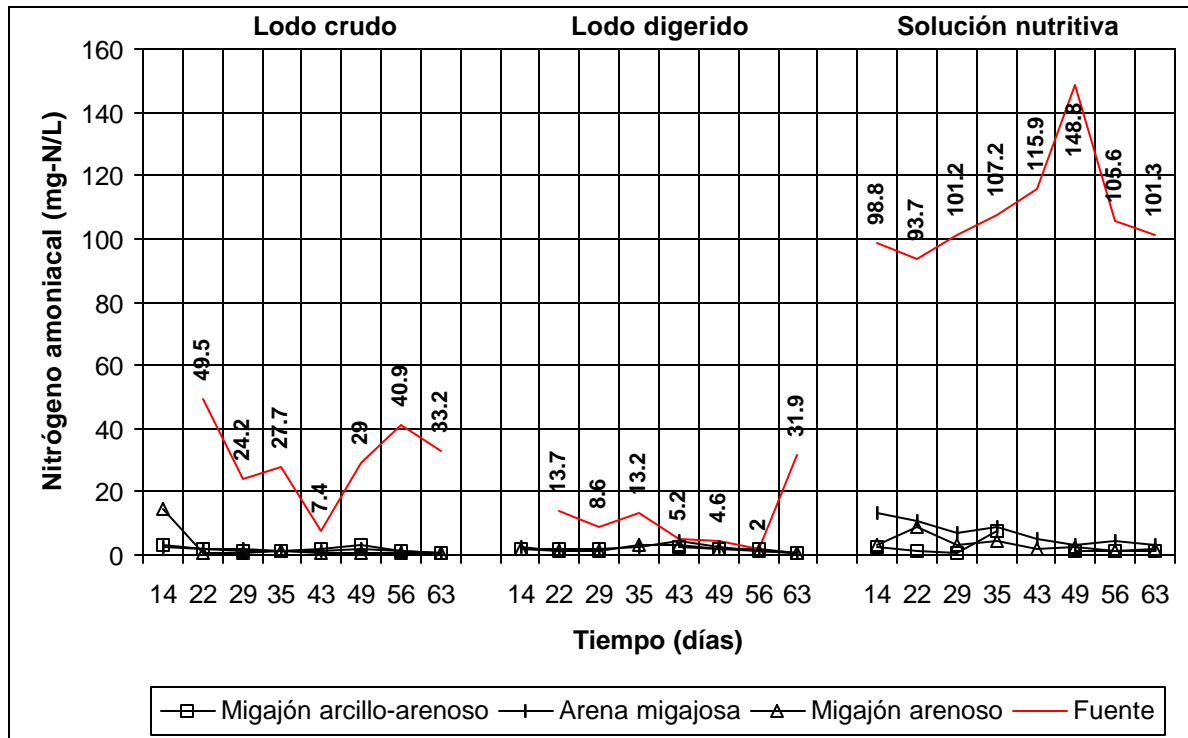
El suelo migajón arcillo-arenoso mostró la mayor capacidad de intercambio catiónico ( $22.2 \text{ meq} \cdot 100\text{g}^{-1}$ ), lo que se tradujo en una mayor retención de amonio cuando se aplicó el tratamiento con solución nutritiva, mientras que en los tratamientos con lodos crudo y digerido se ocultó este efecto debido a que la materia orgánica también contribuye aportando sitios de intercambio.

#### Migración del nitrógeno amoniacal.

A lo largo de este experimento fue posible apreciar algunas de las formas de comportamiento del amonio en su migración a través del suelo. A continuación se comenta sobre tres fenómenos relacionados con el flujo de nitrógeno amoniacal y que se detectaron a lo largo de este trabajo: 1) la relación de la carga eléctrica del ión amonio y el aporte de materia orgánica con la capacidad de intercambio del suelo; 2) el comportamiento de las columnas de suelo como columnas de intercambio; y 3) el equilibrio entre el ión amonio y los sitios de intercambio del suelo con relación a la concentración de la solución.

Como puede observarse en la figura 1, la lixiviación de amonio en los tres tipos de suelo fue similar cuando se aplicaron lodos crudo y digerido durante toda la fase experimental, mientras que al aplicar la solución nutritiva se tuvo una mayor lixiviación en la arena migajosa. Sin embargo, la concentración de nitrógeno amoniacal en el lixiviado de la columna de arena migajosa tratada con solución nutritiva se redujo gradualmente hasta el final del experimento, esto posiblemente debido a la mayor extracción que ejercen las raíces del cultivo y a la acumulación de compuestos orgánicos, como los exudados por las raíces del cultivo y el crecimiento de microorganismos, que se adhieren a la superficie de las partículas de arena y tienen actividad en la adsorción de cationes.

Figura 1. Concentración de nitrógeno amoniacal en el lixiviado en tres suelos con tres fuentes de nutrientes.



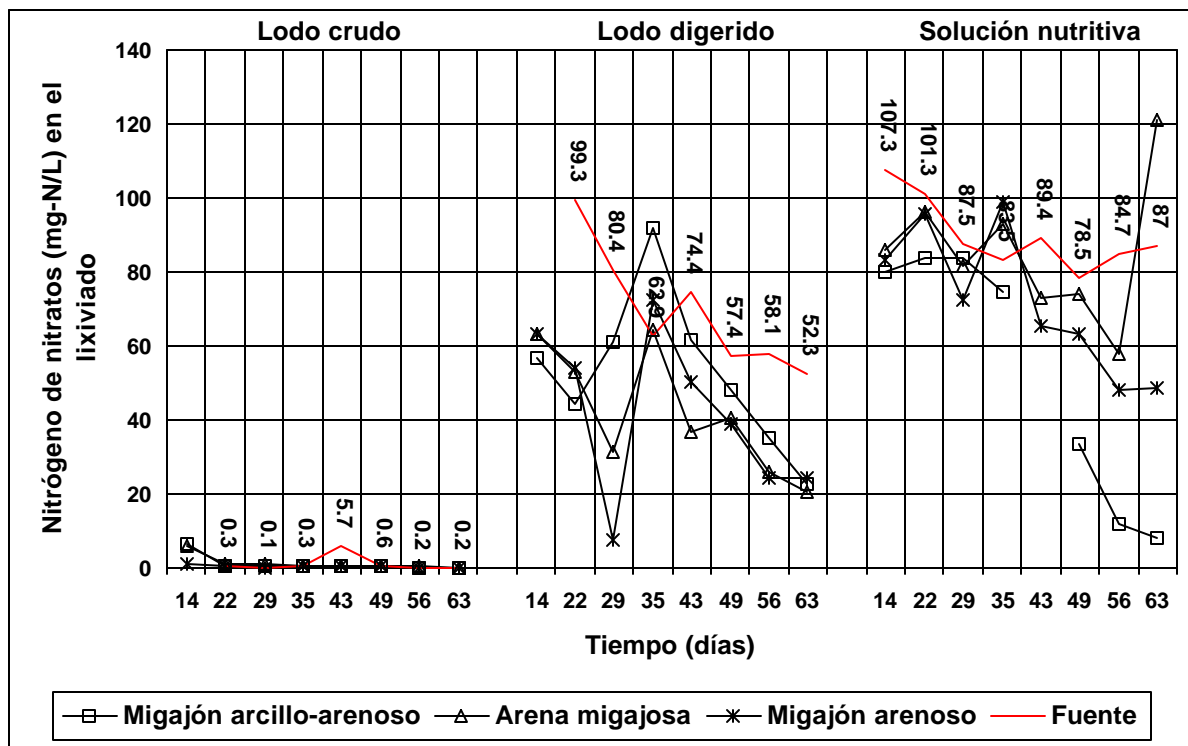
El segundo aspecto por resaltar es el comportamiento de las columnas de suelo como columnas de intercambio catiónico, el cual se aprecia al observar las concentraciones de nitrógeno amoniacal en el lixiviado que mostraron valores entre 0.6 y 14.9 mg-N\*L<sup>-1</sup>, es decir, valores en general bajos, lo cual indica que no se llegó al punto de saturación de la capacidad de intercambio de amonio con el suelo. Si se observa la figura 1 puede verse que las concentraciones más altas de amonio en el lixiviado se registraron en las primeras semanas de experimentación y que hacia la parte final los valores llegaron a los niveles más bajos. Esto se debe a que el suelo actuó como superficie de intercambio mientras que las raíces de la planta funcionaron como un mecanismo regenerante consumiendo el amonio retenido por el suelo durante el intervalo de tiempo entre una aplicación y la siguiente, junto con la acumulación de materia orgánica y el incremento de la actividad microbiana que retienen cada vez mayores cantidades de amonio.

El tercer aspecto importante es que a pesar de la gran capacidad de retención de amonio que mostraron los tres suelos, su concentración en los lixiviados alcanzó niveles de 0.6 mg-NL<sup>-1</sup> pero no se llegó a retener completamente. Esto indica un punto de equilibrio entre la solución de amonio y los sitios de intercambio catiónico del suelo en el que ya no es posible la adsorción de este catión. Esto puede deberse tanto a una propiedad intrínseca del suelo (concentración límite del catión) como a la velocidad de flujo de la solución a través del espacio poroso, pero en este experimento no se tuvieron elementos para definir el mecanismo responsable.

## Nitrógeno de nitratos.

De acuerdo con los resultados obtenidos a lo largo del experimento y a la discusión de los mismos, se detectó que los mecanismos que ejercieron una mayor influencia sobre la lixiviación de los nitratos y que pudieron identificarse con este trabajo fueron en orden decreciente de importancia: 1) la extracción por las raíces del cultivo; 2) la contribución de la materia orgánica en la retención de aniones y 3) la adsorción en las superficies de intercambio del suelo. Por su parte, los procesos microbianos que intervienen en la formación y destrucción de los nitratos (nitrificación y desnitrificación) parecen haberse manifestado con niveles bajos de actividad, por lo que la mayor cantidad de nitratos lixiviables proviene de la solución aplicada.

Figura 2. Concentración de nitrógeno de nitratos en el lixiviado en tres suelos tratados con tres fuentes de nutrientes.



En las aplicaciones de tratamientos posteriores a los 35 días de la siembra, para lodo digerido y solución nutritiva, se observa que la concentración de nitratos en el lixiviado se reduce gradualmente hasta finalizar la experimentación (figura 2). Este comportamiento se debe a que la masa vegetal comenzó a ejercer una demanda de nitratos tal que fue capaz de remover parte de lo que se encontraba adsorbido a los sitios de intercambio, regenerando la capacidad del suelo para retener nitratos en el intervalo entre las aplicaciones de tratamientos.

La aplicación de lodos aportó cantidades importantes de materia orgánica al suelo contribuyendo a incrementar la retención de nitratos. Este fenómeno puede deberse a la presencia de algunas cargas negativas pero principalmente a la retención de agua y solutos por parte de las estructuras orgánicas presentes (celulosa, proteínas, geles).



El proceso de intercambio de nitratos con el suelo se presentó en baja proporción, como se desprende de las altas concentraciones de nitratos en los lixiviados de las columnas tratadas con las soluciones más concentradas (lodo digerido y solución nutritiva). En estos dos tratamientos se observa un incremento en la concentración de nitratos en los lixiviados hasta la cuarta aplicación de soluciones a los 35 días de la siembra, y posteriormente se presenta una disminución gradual hasta el final del experimento, aunque los valores elevados que se midieron a los 35 días de la siembra no son muy confiables por un problema en el flujo de la solución debido a la compactación de la arcilla por falta de humedad, como puede apreciarse en la figura 2. El incremento inicial de la lixiviación se debe a la saturación de los sitios de intercambio, los cuales son muy escasos en los tres tipos de suelo empleados, ocasionando, en algunos casos, la presencia de concentraciones de nitratos mayores en el lixiviado que en la solución aplicada. Este hecho puede explicarse de la siguiente manera: al aplicarse la solución con nitratos a una columna de suelo ya saturada de este ión, la gran mayoría se lixivía junto con el agua en exceso que sale finalmente por el drenaje inferior, de manera que el nitrato aplicado queda contenido en un volumen de agua menor al original debido a que parte de esta queda retenida en el suelo, por lo cual se presenta un efecto de concentración de la solución. Para este comportamiento se observó que el fenómeno de advección tuvo gran importancia cuando la concentración de nitratos en la solución del suelo fue alta y en el caso extremo cuando se aplicó un tratamiento con bajo contenido de nitratos, como el caso del lodo crudo, se obtuvo un lixiviado con prácticamente todo el nitrato aplicado.

Un fenómeno asociado a este es el de la capacidad del suelo para la retención de aniones que se hizo evidente en el caso del nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), que aunque se retiene en pequeñas cantidades en el suelo, fue posible detectar su efecto; en este caso la adsorción de este anión se da por la presencia de sitios con carga positiva en la superficie de la arcilla (en muy baja proporción), y por la formación de una capa de cationes alrededor de los sitios de carga negativa que ejerce una ligera atracción sobre los aniones de la solución del suelo.

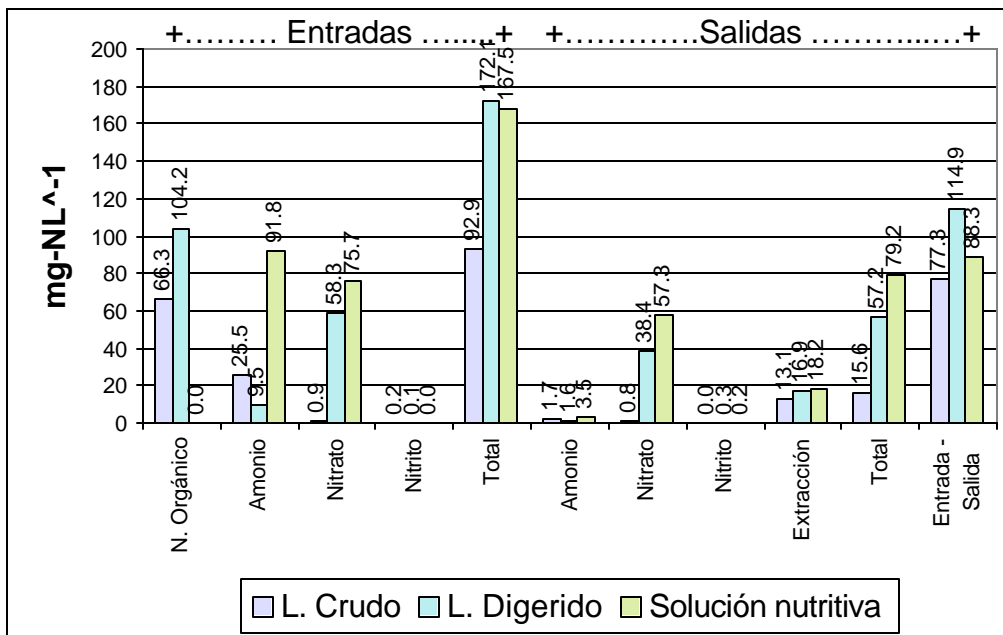
#### Balance de masa.

Con la información recopilada durante la fase experimental se hizo un balance de masa para el nitrógeno dentro del sistema. Como no se realizó la determinación de nitrógeno orgánico (Kjeldahl) se efectuó una estimación con base en datos reportados en la bibliografía. El análisis de varianza ( $\alpha=0.05$ ) para el nitrógeno lixiviado indica que hubo diferencia significativa para tratamientos, pero no para bloques o tipos de suelo. La lixiviación para los tratamientos lodo digerido ( $40.27 \text{ mg-NL}^{-1}$ ) y solución nutritiva ( $60.96 \text{ mg-NL}^{-1}$ ) no fueron diferentes estadísticamente, pero la lixiviación para el tratamiento con lodo crudo fue significativamente menor ( $2.55 \text{ mg-NL}^{-1}$ ).

Los resultados del balance de masa se muestran en la figura 3. Como puede verse, estos resultados muestran que existe mucha relación con la forma química en que se encontraba el nitrógeno en cada uno de los tratamientos.

El tratamiento con lodo crudo, en el que la mayor parte del nitrógeno se encontraba en forma reducida, ya sea en forma de nitrógeno orgánico o amoniacal, mostró la mayor acumulación (como porcentaje) de nitrógeno en la columna. Esto se debe a que el ion amonio se retiene con gran facilidad en la columna de suelo, por lo que el nitrógeno presente en esta forma así como el nitrógeno orgánico que al ser liberado lo hace en forma de amonio, tiene muchas posibilidades de quedar retenido en las superficies de intercambio de los suelos.

Figura 3. Balance de masa de nitrógeno en la columna de suelo para los tres tratamientos evaluados.



El tratamiento con lodo digerido aporta nitrógeno en forma orgánica y de nitratos principalmente. El nitrógeno orgánico, que es la mayor aportación en este caso, tiene grandes posibilidades de quedar retenido en el suelo al pasar a la forma amoniacal, pero el nitrógeno de nitratos que en este caso fue el 23.4% del total aplicado, se lixivia con facilidad, por lo que tiene poca oportunidad de quedar retenido en la columna de suelo o ser aprovechado por las plantas, es por eso que el porcentaje lixivado es mayor que para el lodo crudo (2.8%).

En el caso del tratamiento con solución nutritiva en el que los aportes de amonio (54.8%) y nitrato (45.2%) fueron muy semejantes y no hay aporte de nitrógeno orgánico, se observó la lixiviación más elevada tanto en proporción (36.4%) como en masa (60.96 g-Nm<sup>-2</sup>). Esto está relacionado con la menor proporción de nitrógeno amoniacal con respecto al nitrógeno de nitratos presentes en la solución, pero también fue importante la falta de materia orgánica, por lo que hubo una pobre retención de nitrógeno en la columna.

## Conclusiones

1. La capacidad de los compuestos nitrogenados para migrar a través de la columna de suelo cuando son aplicados en solución, está determinada por la forma química en que se encuentran, hallándose que el nitrógeno en forma de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) tiene mayor capacidad para migrar junto con la solución (por advección), mientras que el amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), en su mayoría, queda retenido en la superficie de intercambio catiónico del suelo.
2. La lixiviación de compuestos nitrogenados cuando se aplicó lodo digerido fue 15.8 veces mayor que cuando se aplicó lodo crudo, debido al mayor contenido de nitrógeno en forma de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) en el primer caso.
3. El aporte de materia orgánica de los lodos aplicados disminuyó la lixiviación de nitrógeno en sus formas amoniacal y de nitratos en el suelo arena migajosa.

4. La presencia de nitritos nos indica que hubo transformación de nitrógeno amoniacal a nitratos en las columnas tratadas con lodo digerido y solución nutritiva. Dicha transformación no se detectó en las columnas de suelo tratadas con lodo crudo debido a la competencia por nitrógeno amoniacal que ejercieron microorganismos heterótrofos y el cultivo.
5. En términos agronómicos la producción de materia seca mostró incrementos de 29.0 y 39.4% cuando se aplicaron lodo digerido y solución nutritiva respectivamente respecto al tratamiento con lodo crudo. Desde este punto de vista lo más recomendable sería aplicar lodos digeridos en forma aerobia con el fin de lograr el mayor rendimiento en producción de follaje (26.1 Ton\*ha<sup>-1</sup>).
6. Cuando se analizó la variable altura de planta se observó que la tasa de crecimiento disminuyó hacia el final de la fase experimental en los tratamientos con lodo digerido y solución nutritiva, mientras que para el tratamiento con lodo crudo la tasa de crecimiento se mantuvo alta hasta finalizar las observaciones.

### Referencias bibliográficas

1. CNA, (1999). Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento 06/oct/01: [http://www.cna.gob.mx/portal/publicaciones/subsector99/Cap6\\_99.PDF](http://www.cna.gob.mx/portal/publicaciones/subsector99/Cap6_99.PDF).
2. Krogmann, Uta; Lisa S. Boyles; C. James Martel; Katherine A. McComas. (1997). Biosolids and Sludge Management *Water Environment Research*. Vol. 69 No. 4. USA.
3. Muñoz Gant F; M.J. Polo Gómez y J.V. Giráldez Cervera, (1999) Modificaciones de algunas propiedades físicas en un suelo del Valle del Guadalquivir enmendado con lodos de depuradora, en: Índice para estudios en la zona no saturada del suelo, editores: R. Muñoz Carpena, A. Ritter Rodríguez, C. Tascón Rodríguez. Actas de las IV Jornadas sobre Investigación de la Zona no Saturada del Suelo-ZNS'99
4. Muñoz Nava, Hipólito. (1997). Lixiviación de aluminio en lechos de disposición de lodos. Tesis de maestría en Ingeniería (Ambiental) División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. México.
5. Palacios, M.P., E. Del-Nero y N. Pavón. (1999). Influencia del agua de riego con agua de depuradora municipal de diferentes calidades sobre los suelos del cultivo de platanera, en: Índice para estudios en la zona no saturada del suelo, editores: R. Muñoz Carpena, A. Ritter Rodríguez, C. Tascón Rodríguez. Actas de las IV Jornadas sobre Investigación de la Zona no Saturada del Suelo-ZNS'99
6. Richman, Michael. (1996). Nitrate High in Agricultural Wells. *Water Environment & Technology*. Vol. 8 No. 7 July 1996.