

COMPORTAMIENTO DE LAS ESPECIES NITROGENADAS EN UNA PARCELA EXPERIMENTAL REGADA CON AGUAS RESIDUALES URBANAS DEPURADAS

ESTELLER, M. V.⁽¹⁾ y MORELL, I.⁽²⁾

⁽¹⁾Centro Interamericano de Recursos del Agua.

Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca. México.

⁽²⁾Grupo de Investigación de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Universitat Jaume I. Apdo. 224. Castellón.

El nitrógeno en la zona no saturada

El nitrógeno es un elemento fundamental para el crecimiento de las plantas, ya que es un nutriente esencial que debe encontrarse en el suelo en determinadas cantidades para obtener un desarrollo óptimo de los cultivos. Los aportes de nitrógeno al suelo deben ser los necesarios, ya que cantidades excesivas de este elemento puede provocar la contaminación de las aguas subterráneas por el lixiviado de nitratos.

El nitrógeno en el agua residual se presenta en forma de nitrógeno orgánico, amonio y nitrato, fundamentalmente, aunque también puede presentarse como nitrito, pero en cantidades muy pequeñas. La proporción en que aparecen estos compuestos en un agua tratada depende del origen del agua residual y del sistema de tratamiento al que ha sido sometida. El contenido en nitrógeno orgánico suele ser inferior a la mitad de todo el nitrógeno existente en el agua residual y representa una mezcla de varios compuestos como son aminoácidos, azúcares aminados y proteínas, que se convierten en amonio por acción de los microorganismos presentes en el agua residual y en el suelo. La concentración de amonio suele oscilar entre 5 y 40 mg. N/l y la de nitratos desde 0 hasta más de 30 mg. N/l (Broadbent y Reisenauer, 1990).

Una vez aportada el agua de riego al suelo, el nitrógeno existente entra a formar parte del ciclo del nitrógeno en el suelo; dentro de este ciclo se definen una serie de mecanismos de transformación y transporte que afectan a las diferentes especies nitrogenadas (figura 1).

El nitrógeno está presente en el suelo en distintas formas, tanto orgánicas como inorgánicas. Las formas inorgánicas son nitratos, nitritos, amonio intercambiable, amonio no intercambiable que se encuentra fijado a las partículas minerales, nitrógeno molecular (gas) y óxido nítrico (gas). También existen compuestos intermedios como son el óxido nítrico, el dióxido de nitrógeno, la hidroxilamina, etc.

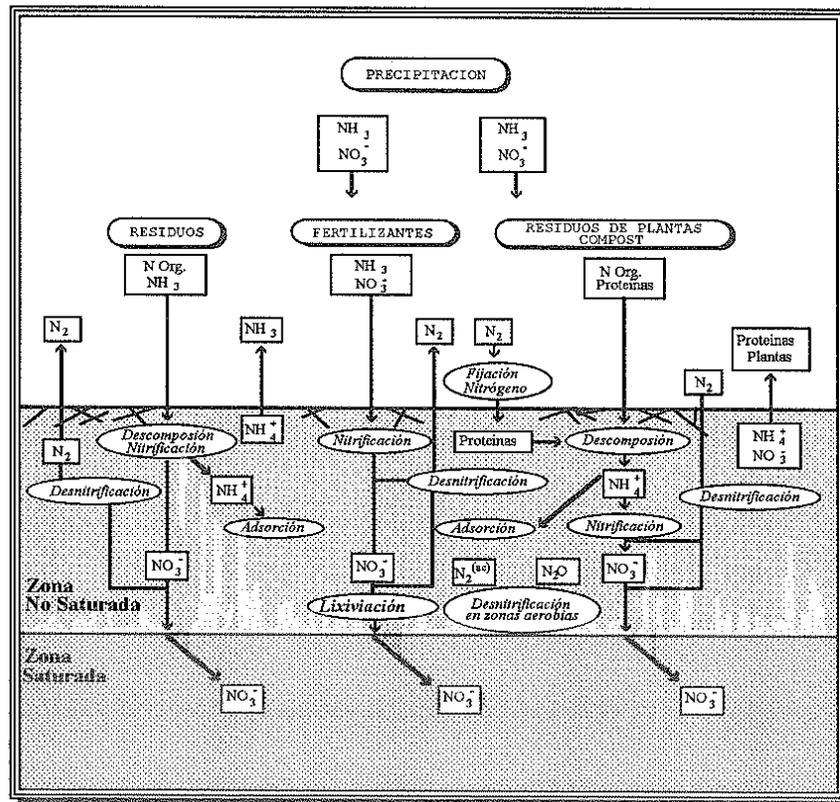


Figura 1.- Ciclo del nitrógeno (tomado de Freeze y Cherry, 1979)

Desde el punto de vista agrícola, el nitrato y el amonio intercambiable son las formas de nitrógeno inorgánico más importantes ya que son solubles en el agua y disponibles rápidamente para ser asimilados por las plantas, inmovilizados, desnitrificados, fijados o volatilizadas.

El nitrógeno orgánico está relacionado con la materia orgánica del suelo y se encuentra en forma de proteínas, biomasa y ácidos nucleicos. Una parte de este nitrógeno es fácilmente accesible a los microorganismos y es descompuesto rápidamente; una segunda parte, el humus, es estable biológica y físicamente y por tanto más resistente al ataque de microorganismos, descomponiéndose con más lentitud.

En el caso en que se de un alto consumo de oxígeno, como ocurre cuando se aplican aguas residuales con un elevado contenido en materia orgánica que provoca un incremento de la actividad microbiológica, se pueden dar condiciones anaerobias. También se presentan estas condiciones si existe alto contenido en agua y los agregados son gruesos y están saturados. También se pueden dar en un mismo suelo y al mismo tiempo condiciones anaerobias y aerobias cuando la porosidad sea baja y el consumo de oxígeno rápido.

La materia orgánica presente en aguas residuales puede condicionar la tasa de desnitrificación si su concentración es lo suficientemente elevada (Broadbent y Reisenauer, 1990)

En el caso de agua residual, la volatilización del amonio se puede producir durante el riego debido al carácter alcalino del agua (pH superior a 7), sobre todo en el sistema de riego con aspersores; si el riego es por extensión las pérdidas son menores.

En experiencias sobre percolación de aguas residuales llevados a cabo tanto en ensayos de laboratorio como en ensayos de campo se han obtenido resultados semejantes a los aquí expuestos. En una experiencia de campo, cuyos resultados se exponen en Rettinger y Merkl (1990) y Rettinger y Bischofsberger (1990), se comprobó que la disminución del amonio era debida al intercambio catiónico y a la nitrificación microbológica; simultáneamente a esta disminución se producía un incremento en la concentración de nitratos. También se observó una leve desnitrificación.

Los resultados obtenidos por Bustamante (1988) en investigaciones sobre filtros verdes donde se estudiaba la evolución de las especies nitrogenadas en la zona no saturada, indican un rápido descenso del amonio, nitrato y nitrógeno total en los niveles superficiales ya que una parte del nitrógeno se perdía hacia la atmósfera debido a que en suelos calizos el amonio reacciona con el anión carbonato formando $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, especie que se descompone en amoníaco gas. Ortega *et al.* (1989) y Salgot y Pascual (1991) han realizado experiencias a escala de laboratorio en columnas lisimétricas y comprobaron, comparando las entradas y salidas de amonio, que la reducción y/o transformación de este ión era superior al 99%, mientras que la concentración de nitratos aumentaba considerablemente en el agua lixiviada. Calcularon que el porcentaje de nitrógeno total percolado con respecto al añadido tenía un valor máximo del 41% en los meses de verano mientras que durante el resto del año las pérdidas eran inferiores. El resto del nitrógeno quedaría retenido por el suelo y/o las plantas.

En otras investigaciones realizadas con lisímetros con objeto de estudiar la aplicación en el terreno de aguas residuales (Suzuki *et al.*, 1992) se puso de manifiesto la rápida adsorción del amonio en el suelo y el aumento del contenido en nitratos por efecto de la acción de las bacterias que oxidan el amonio que se encuentra fijado. Además, se llevó a cabo el seguimiento de la evolución del nitrógeno total, comprobándose un descenso de su concentración en los primeros centímetros del suelo producido por la absorción del nitrógeno por parte de las plantas y/o la desnitrificación.

Resultados obtenidos

Los resultados que se presentan corresponden al periodo Junio 1992 - Octubre 1993 en una parcela experimental situada en la Estación Depuradora de Aguas Residuales de la ciudad de Castellón (Esteller, 1994).

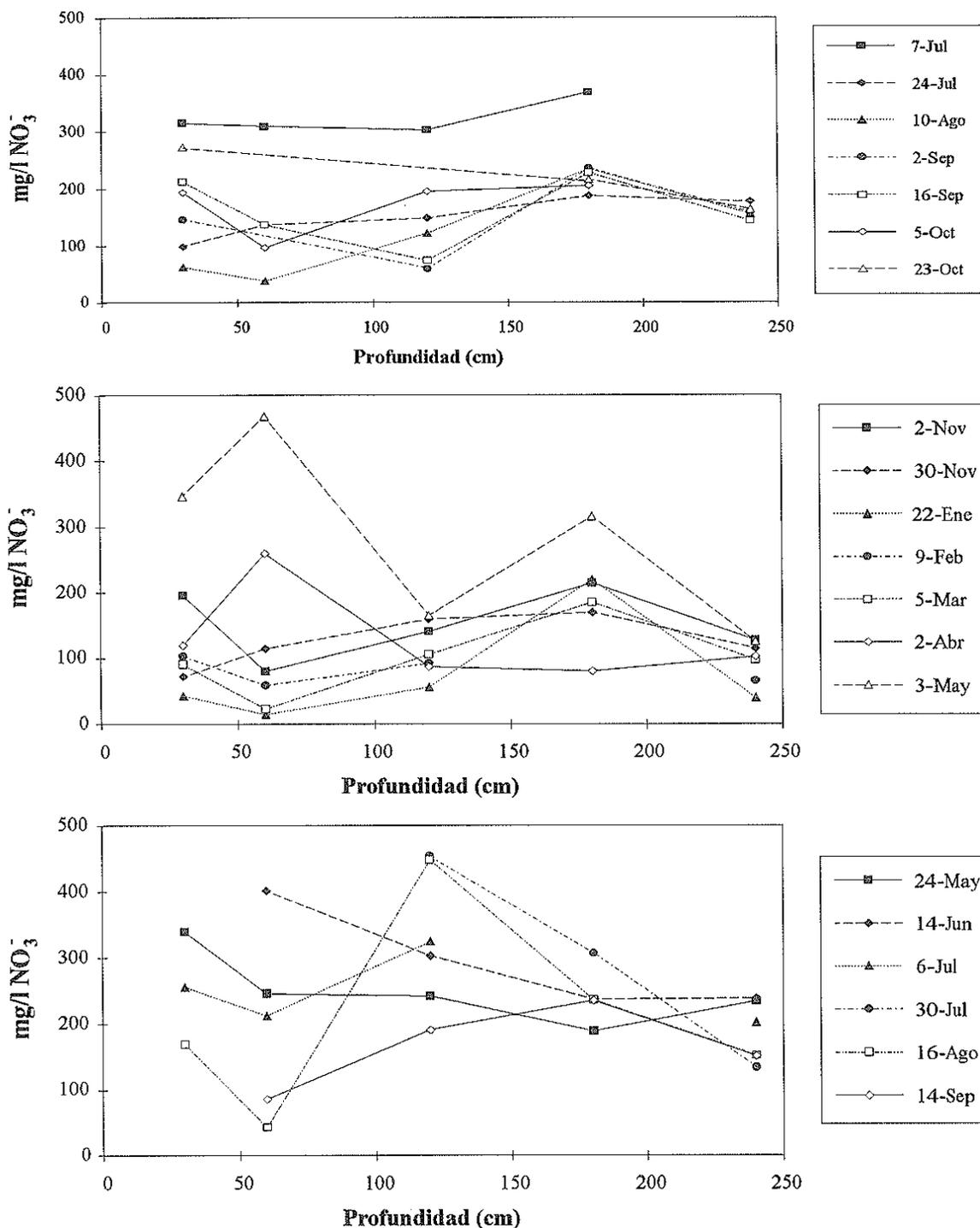


Figura 2.- Evolución del contenido en nitratos en la zona no saturada durante el periodo de estudio

El nitrógeno en el agua depurada utilizada para riego en la parcela experimental se presenta, fundamentalmente, en forma de nitrógeno orgánico y amonio. La presencia de nitratos es relativamente baja (concentración media 11 mg/l), y mucho más la de nitritos (valor medio 0.2 mg/l). El aporte medio de nitrato por agua de lluvia es de 6 mg/l.

La evolución del nitrato en profundidad para las diferentes campañas de muestreo realizadas se expone en la figura 2. Se observa que al inicio

del periodo de estudio la concentración de nitratos en el agua intersticial era bastante elevada, con contenidos superiores a 200 mg/l.

Durante las siguientes campañas se produce un progresivo lavado de este ión en los primeros decímetros de la zona no saturada como consecuencia de la infiltración del agua de riego o de lluvia ya que los aportes de nitrato por ambos tipos de agua son limitados.

Las concentraciones que se detectan en la primera campaña analizada están relacionadas con las prácticas agrícolas de fertilización que se han desarrollado en este área en los últimos años, ya que la parcela experimental se ubica en un antiguo campo de cítricos.

Como ya se ha comentado, la infiltración de agua produce un progresivo desplazamiento del nitrato desde los niveles más superficiales hacia los más profundos, tal y como se puede comprobar en la campaña de agosto de 1992. La concentración de nitratos en el agua intersticial recogida en los primeros 120 cm no supera los 60 mg/l, observándose un máximo a 180 cm con un valor de 230 mg/l, que representaría el desplazamiento que ha sufrido el frente de nitratos desde el inicio del riego.

Los elevados contenidos que se aprecian en algunas de las campañas en las muestras tomadas a 30 cm de profundidad podrían ser consecuencia de la nitrificación del amonio y nitrito así como de la mineralización y posterior nitrificación del nitrógeno orgánico presentes en el agua depurada. Este proceso se podrá comprobar cuando se estudie la evolución de estos iones en profundidad, ya que simultáneamente al incremento de la concentración de nitrato se deberá producir un descenso de estas especies nitrogenadas.

El proceso de lixiviación se mantuvo, a grandes rasgos, hasta marzo de 1993. El día 30 de este mes se llevó a cabo una aplicación de fertilizantes (nitrosulfato amónico) que se reflejó rápidamente en la campaña efectuada en abril, en la cual se observa un importante aumento de la concentración de nitratos en los 60 primeros centímetros de la zona no saturada. Este incremento se aprecia de forma más clara en el siguiente muestreo (mayo) ya que durante el periodo de tiempo transcurrido desde la aplicación se ha producido la nitrificación de casi todo el amonio aportado, alcanzándose a 60 cm de profundidad una concentración máxima de 460 mg/l.

El 9 de junio se realiza otra fertilización (turba y sulfato de hierro) con aportes de nitrógeno menores al del anterior abonado, observándose en la campaña posterior (14 de junio) a este abonado un nuevo incremento sustancial de la concentración de nitratos en el agua intersticial en las cápsulas más superficiales.

Después de la fertilización se observa un lixiviado de los niveles más próximos a la superficie del terreno, que continúa después de la segunda

aplicación de fertilizantes. En la campaña realizada el 30 de julio de 1993 el frente de nitratos ha llegado a una profundidad de 120 cm con un valor próximo a los 450 mg/l, detectándose en los niveles superficiales concentraciones inferiores a 200 mg/l.

En la figura 3 se presenta la evolución temporal del contenido en nitratos a diferentes profundidades. Se aprecia, con claridad, que el máximo de nitratos se detecta en el nivel más superficial de la zona no saturada días después de efectuar el abonado. Con posterioridad, este máximo se va desplazando en profundidad; al final del periodo de estudio se comprueba que este frente de nitratos no parece haber alcanzado aún los 180 cm de profundidad, ya que no se detecta, en las muestras de agua intersticial recogidas, un incremento sustancial de la concentración.

A lo largo del periodo de estudio la concentración máxima de nitratos cuantificada a 240 cm de profundidad fue de, aproximadamente, 240 mg/l mientras que la mínima fue de 40 mg/l, lo cual representa un amplio rango de variación, si bien se puede estimar una concentración media de 144 mg/l. Estos valores indican las concentraciones de nitratos que podrían alcanzar el acuífero, ya que en este área el nivel piezométrico se localiza a una profundidad en torno a los 280 cm.

En la figura 4 se presenta la evolución del amonio a lo largo del perfil de la zona no saturada durante el periodo de estudio. El primer hecho a destacar es el drástico descenso que se constata en los 30 primeros centímetros de la zona no saturada. En el agua depurada la concentración de este ión supera los 3 mg/l, mientras que en el agua intersticial recogida en las cápsulas no se suelen alcanzar concentraciones superiores a 1 mg/l. Entre 30 y 60 cm de profundidad se detecta, en casi todos los muestreos, un incremento, obteniéndose valores superiores a 2 mg/l. A partir de esta profundidad se observa que la concentración de este ión disminuye drásticamente detectándose valores inferiores a 0.7 mg/l, siendo frecuente que no se constate su presencia a partir de los 180 cm de profundidad.

Este comportamiento se modifica después de la aplicación del nitrosulfato amónico. En el muestreo de abril de 1993 la concentración de amonio en la cápsula más superficial (30 cm) fue de 4.8 mg/l y en las siguientes campaña de 3.5 (3 de mayo) y 2.8 mg/l (24 de mayo). En el resto de los muestreos el contenido de amonio detectado a esta profundidad suele ser inferior a 2 mg/l. Se aprecia, asimismo, que en los muestreos realizados después de precipitaciones intensas (octubre de 1992 y febrero de 1993) la presencia de amonio en todo el perfil de la zona no saturada es muy baja, con concentraciones que no superan los 0.1 mg/l, e incluso prácticamente nulas.

Los procesos que explican el descenso del contenido en amonio en los primeros 30 centímetros de la zona no saturada son, esencialmente, la volatilización y la nitrificación pues las condiciones para que se den estos fenómenos en este nivel superficial son adecuadas: pH del agua superior a

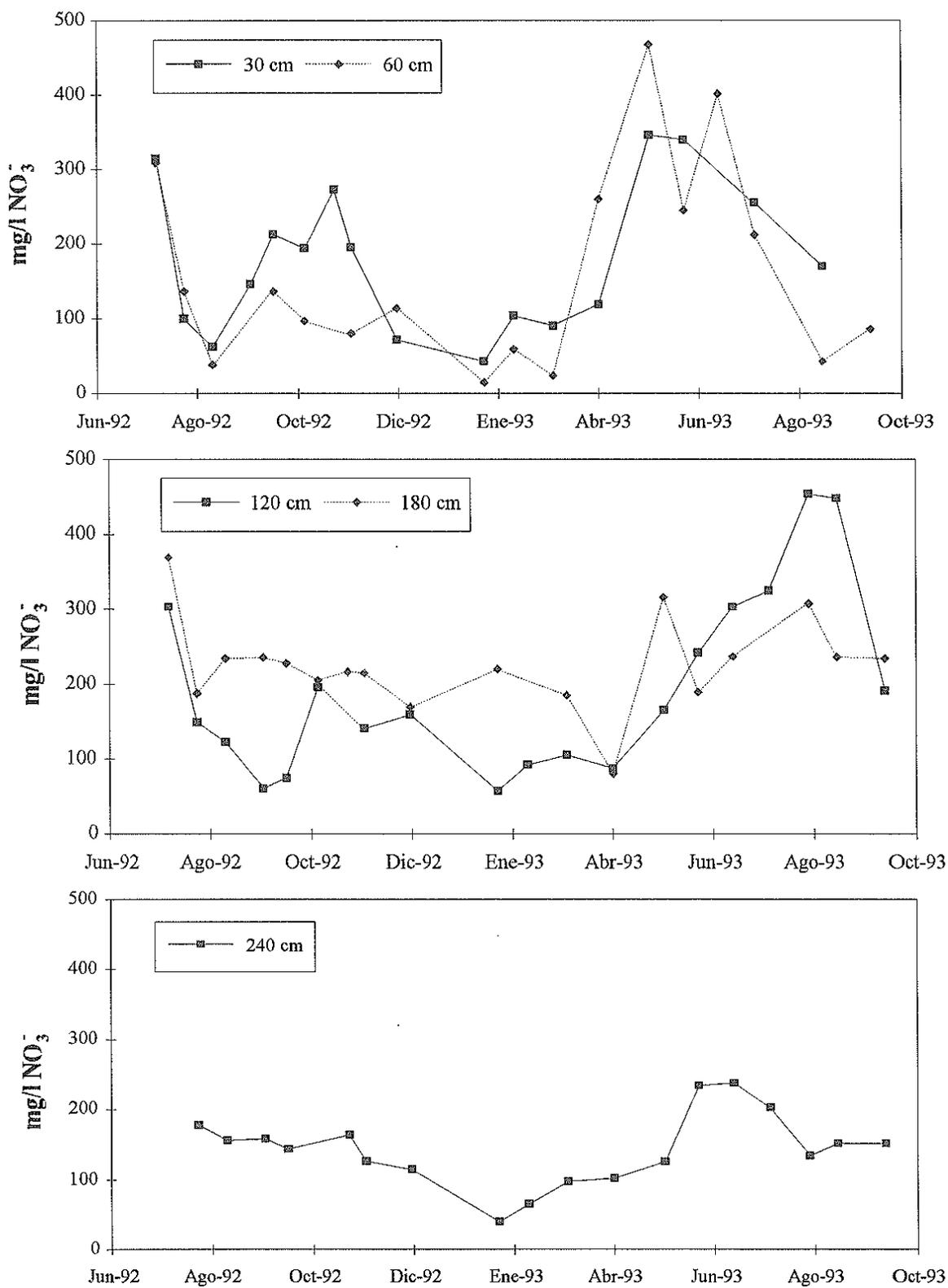


Figura 3.- Evolución temporal del contenido en nitratos a diferentes profundidades

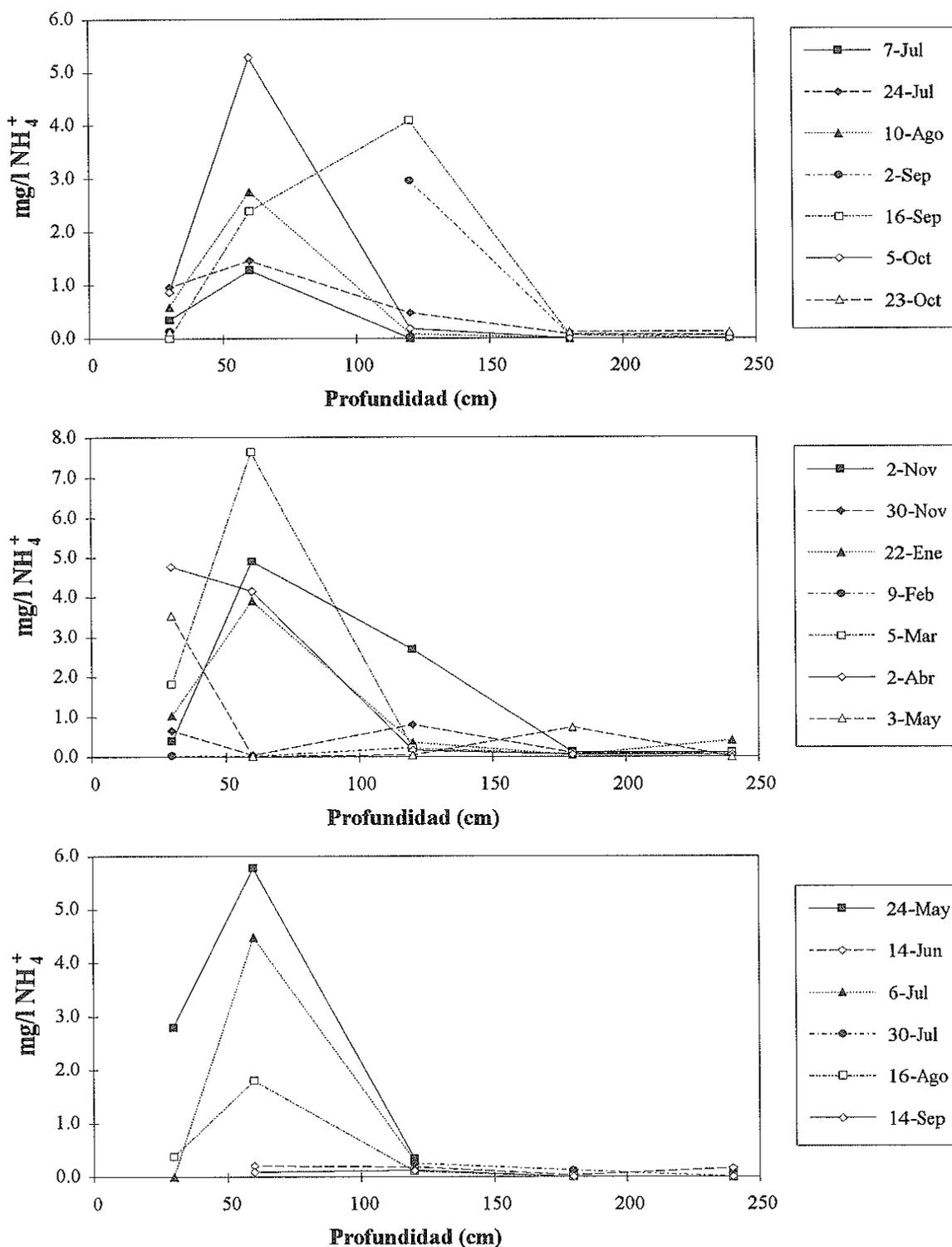


Figura 4.- Evolución del contenido en amonio en la zona no saturada durante el periodo de estudio

7, existencia de materia orgánica y textura franca. Además, al ser un riego por inundación, el agua se infiltra lentamente lo que permite que esté en contacto con el aire varias horas, hecho que facilita ambos procesos.

También interviene, y de manera notable, la adsorción o fijación del ión amonio a los minerales de la arcillas o a la materia orgánica. Tanto la

presencia de minerales de la arcilla como de materia orgánica en los primeros 30 centímetros de profundidad de la parcela es bastante elevada tal y como se ha podido comprobar en el estudio de las características texturales y físico-químicas de la zona no saturada.

El intercambio iónico que puede afectar al amonio ha sido comprobado en laboratorio en base a una experiencia realizada en columnas rellenas con muestras de suelo procedentes de los diferentes niveles que han sido definidos en la zona no saturada. A lo largo de las columnas se hizo pasar una solución de amonio de concentración conocida. El agua percolada se enriqueció en calcio, mientras que el amonio se detectaba en pequeñas cantidades (Giménez, 1994).

Como ya se ha comentado las máximas concentraciones de amonio se encuentran a 60 cm de profundidad. Este elevado contenido puede ser debido a la existencia de condiciones anaerobias a esta profundidad como consecuencia de la textura fina del suelo (franco arcillosa arenosa), lo cual implicaría que la renovación del oxígeno presente en los poros sea muy baja y que, además, el grado de saturación sea elevado.

La presencia de amonio en los primeros centímetros del perfil de la zona no saturada puede ser debida, además, a la mineralización del nitrógeno orgánico presente en el agua residual depurada.

Como conclusión se puede indicar que las transformaciones que afectan al amonio se producen en los niveles superficiales, entre 0 y 120 cm de profundidad; a partir de esta profundidad la presencia del ión amonio es muy baja, siendo la concentración media detectada en el agua intersticial recogida en la cápsula instalada a 240 cm de profundidad de 0.1 mg/l.

En cuanto al ión nitrito cabe señalar que su presencia está ligada, por una parte, a los aportes de este ión por el agua depurada utilizada para riego y, por otra, a la nitrificación del amonio procedente tanto del agua depurada como de la mineralización del nitrógeno orgánico, ya que el nitrito es un producto intermedio de esta transformación. Este último proceso es mucho más relevante cuantitativamente ya que el contenido de nitrito en el agua depurada rara vez supera los 0.3 mg/l.

En la figura 5 se muestra la evolución del contenido de nitrito a lo largo del perfil de la zona no saturada. Se observa que presenta un comportamiento similar, en líneas generales, al del ión amonio; con un fuerte descenso en los primeros centímetros de la zona no saturada donde se pasa de concentraciones en torno a 0.2 mg/l, en el agua de riego, a contenidos inferiores a 0.1 mg/l a 30 cm de profundidad. A continuación se aprecia un máximo a 60 cm, observándose a partir de esta profundidad un descenso continuo de su concentración.

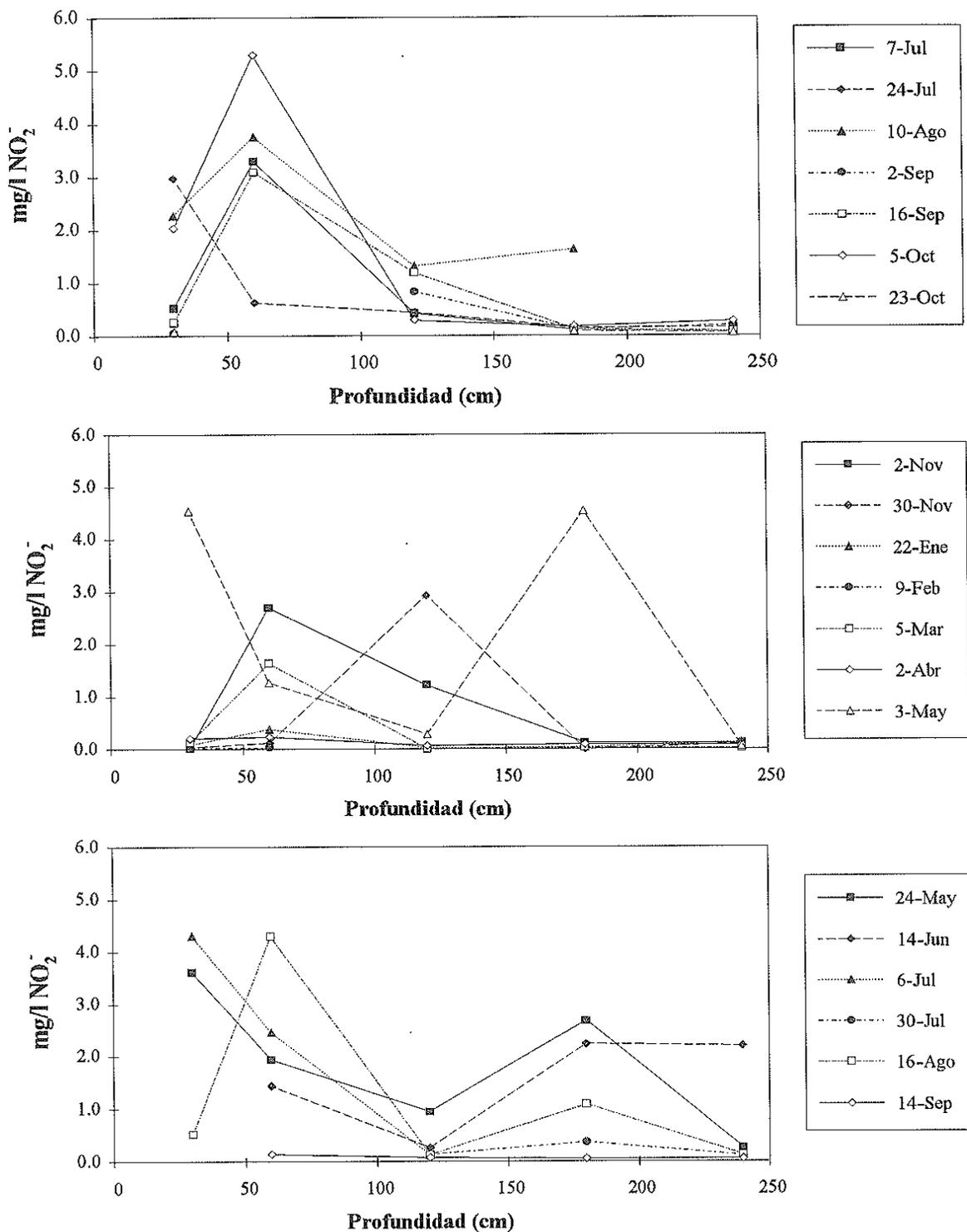


Figura 5.- Evolución del contenido en nitritos en la zona no saturada durante el periodo de estudio

En las campañas de muestreo posteriores a la aplicación de fertilizantes se observa un máximo en la concentración del ión a 30 cm de profundidad. En el caso del muestreo efectuado después del abonado llevado a cabo en marzo, este máximo tiene un valor de 4.5 mg/l (campaña de mayo) y en el muestreo realizado con posterioridad a la fertilización de junio el valor es de 4.3 mg/l (campaña de julio).

En los muestreos efectuados después de intensas precipitaciones (octubre de 1992 y febrero de 1993) la presencia de nitrito en todo el perfil de la zona no saturada es más baja, con concentraciones en torno a 0.1 mg/l, e, incluso, por debajo del límite de detección.

La concentración media que se alcanza en la cápsula de 240 cm de profundidad es de 0.2 mg/l, con un rango de variación comprendido entre 0 y 2.2 mg/l.

Asimismo, se observa en esta figura que a partir de la campaña de mayo de 1993 (un mes después de efectuarse el abonado con nitrosulfato amónico) se detecta otro máximo, con un valor de 4.5 mg/l, a una profundidad de 180 cm, que va disminuyendo en los siguientes muestreos hasta alcanzar una concentración de 0.1 mg/l en la campaña efectuada en septiembre. La existencia de este máximo puede estar relacionada con la contaminación de alguna de las cápsulas que se encuentran instaladas a esta profundidad.

El proceso que da lugar a la disminución de la presencia del ión nitrito a lo largo del perfil de la zona no saturada es fundamentalmente la nitrificación, ya que esta especie nitrogenada es muy inestable y fácilmente oxidable a nitrato.

En conclusión, se puede señalar que el grado de retención y/o transformación del amonio y nitrito es muy elevado, con reducciones próximas al 100%. Con respecto al nitrato, los escasos aportes de este ión debidos al riego con agua depurada dan lugar a un fuerte lixiviado en todo el perfil de la zona no saturada, aunque en el nivel más superficial la presencia de este ión es significativa como consecuencia de la nitrificación del amonio y nitrito así como de la transformación del nitrógeno orgánico. También es de suponer que se pueda producir desnitrificación sobre todo en los meses de verano cuando la temperatura es mayor.

Referencias

- BROADBENT, F.E. y REISENAUER, H.M., (1990) "Destino de los componentes del agua residual en el suelo y en los acuíferos: el nitrógeno y el fósforo". In: *Mujeriego, R. (Edit) "Manual práctico de riego con agua residual municipal regenerada". Univ. Politécnica de Catalunya. Barcelona. pp: 331-346.*
- BUSTAMANTE, I., (1988) "El subsuelo como agente depurador de vertidos líquidos contaminantes". *Rev. Informaciones y Estudios MOPU*, N° 49, 71 pp.
- ESTELLER, M.V., (1994) Consideraciones sobre el aprovechamiento de los recursos hídricos en la Plana de Castellón. Utilización de aguas residuales para riego. *Tesis Doctoral. Universidad de Granada.* 446 pp.
- FREEZE, R.A. y CHERRY, J.A. (1979) "Groundwater contamination" pp: 383-462. In: *"Groundwater" Prentice Hall. London.* 553 pp.
- GIMENEZ, E. (1994) Caracterización hidrogeoquímica de los procesos de salinización en el acuífero detrítico costero de la Plana de Castellón. *Tesis Doctoral. Universidad de Granada.* 469 pp.

- ORTEGA, C.; SALGOT, M. y CARDUS, J. (1989) "Control de la reutilización de aguas residuales depuradas. Posible impacto en las aguas subterráneas." *Hidrogeología y Rec. Hidrc.*, XII: 43-52.
- RETTINGER, S. y MERKL, G., (1990) "Potential pollution hazards to groundwater by sewage disposal." In: *Nawang y Rahman (Eds). Proc. Int. Symp. Urban Planning and Stormwater Management. Kuala Lumpur. Malaysia.* pp: 375-389.
- RETTINGER, S. y BISCHOFBERGER, W., (1990) "Subsoil percolation of sewage: Purification efficiency of unsaturated zone and mass balance of organic load". *Wat. Sci. Tech.*, 22(7/8): 313-315.
- SALGOT, M. y PASCUAL, M.A., (1991) "Irrigation with treated wastewater: recycling, recovery and treatment of nutrients". *Proc. Int. Symp. Wastewater Reclamation and Reuse. Gerona.*
- SUZUKI, T.; KATSUNO, T. y YAMAURA, G., (1992) "Land application of wastewater using three types of trenches set in lysimeters and its mass balance of nitrogen". *Wat. Res.*, 26(11): 1433-1444.