

META-ANÁLISIS DE LAS ESTRATEGIAS PARA EL CONTROL DE LA LIXIVIACIÓN DE NITRATOS EN SISTEMAS DE REGADÍO Y SU EFECTO EN EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO

M. Quemada^{1*}, M. Branski², M.N.J. Nobel-de Lange², A. Vallejo¹ y J.M. Cooper²

¹Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid, Avd. Complutense s/n, 28040 Madrid. e-mail: miguel.quemada@upm

²School of Agriculture, Food and Rural Development, Newcastle University, Devonshire Building, Newcastle upon Tyne, NE1 7RU, Reino Unido. email: julia.cooper@newcastle.ac.uk

RESUMEN. La lixiviación de nitratos (NL) supone un coste para el agricultor y el medio ambiente. Se realizó un meta-análisis (MA) de resultados publicados en sistemas de regadío para cuantificar el efecto que las prácticas agrarias pueden tener en NL. Se identificaron 44 artículos científicos que se clasificaron en cuatro estrategias principales (mejora del manejo de agua y mejora manejo de fertilizantes, uso de cultivos cubierta y tecnología de los fertilizantes). Las estrategias que ajustaban la aplicación de agua redujeron NL en una media del 80%. Mejorar el manejo de los fertilizantes redujo NL en un 40%. Utilizar cubiertas vegetales en el intercultivo redujo NL en un 50% si eran no-leguminosas y no tuvo efecto si eran leguminosas. Nuevas tecnologías de fertilizantes fueron las que menos redujeron NL. Se recomienda implementar primero el manejo de agua y fertilizantes. El uso de otras estrategias como cubiertas vegetales y nuevos fertilizantes puede suponer una reducción añadida de NL.

ABSTRACT. Nitrate leaching (NL) imposes a cost on the farmer and the environment. A meta-analysis of published results from agricultural irrigated systems was conducted to quantify the reduction in NL that can be achieved by agricultural strategies. Forty-four scientific articles were identified which investigated four main strategies (water and fertilizer management, use of cover crops and fertilizer technology). Management practices that adjust water application to crop needs reduced NL by a mean of 80%. Improved fertilizer management reduced NL by 40%. Replacing a fallow with a non-legume cover crop reduced NL by 50% while using a legume did not have any effect on NL. Improved fertilizer technology was the least effective of the selected strategies. Overall, we recommend that the primary approaches used should be optimization of water and fertilizer management. More innovative methods including the use of cover crops and improved fertilizer technologies may offer additional reductions in NL.

1.- Introducción

La agricultura de regadío representa el 16% de la tierra cultivada en el mundo y más del 40% de la producción agrícola. El riego contribuye a la diversificación de cultivos y, utilizando prácticas agrarias adecuadas, puede mejorar la sostenibilidad de las zonas rurales. Sin embargo, el regadío

tiene potencial para la contaminación de aguas debido a que los cultivos son fertilizados abundantemente para alcanzar rendimientos elevados (Isidoro et al. 2006). En la legislación actual de los países desarrollados orientada a preservar la calidad del agua es imperativo reducir la cantidad de nitratos aportada desde las tierras de cultivo a las aguas subterráneas y superficiales. Los mecanismos de pérdida de N son comunes en la agricultura de secano y regadío; sin embargo, las estrategias y las opciones para asegurar la sostenibilidad medioambiental y económica son muy diferentes (Vázquez et al., 2006). Por lo tanto, se realizó un MA de la información publicada en revistas científicas sobre estrategias para reducir NL en sistemas de regadío. El objetivo fue la identificación de estrategias para el control de la NL y la cuantificación de su efecto en la reducción de NL, en el rendimiento de los cultivos y en la eficiencia de uso del N (NUE). Pueden encontrarse más detalles sobre este trabajo en Quemada et al. (2013).

2.- Materiales y métodos

Se realizó una revisión en la ISI-Web of Science de la literatura científica publicada para identificar los artículos que reportaban NL en sistemas de cultivo de regadío. Se obtuvieron 234 artículos publicados entre 1963 y 2012 en revistas del Journal Citation Report. Los artículos fueron revisados e incluidos en el MA si cumplían los siguientes criterios: i) estudio en condiciones de campo durante al menos una estación de crecimiento; ii) NL medido como pérdida de masa de N; iii) diseño experimental detallado para determinar aspectos críticos de los tratamientos, manejo de riego y fertilización; iv) estudios que reflejan prácticas características de una región. Después de la selección quedaron un total de 44 artículos para el MA.

Los datos de NL fueron extraídos de los artículos que comparaban las diferentes estrategias de mitigación. Cuando estaban disponibles, se extrajeron también datos de rendimiento del cultivo (Y) y el N aplicado como fertilizante (Nap) para cada observación. Además, se calculó NUE como Y por unidad de Nap ($\text{kg kg}^{-1} \text{N}$). El número total de observaciones de NL en la base de datos fue de 279, de las cuales 166 contenían datos de Y. La base de datos se completó con información de los artículos sobre los principales factores ambientales (clima y suelo) y de manejo (cultivo y tecnología del riego). Se identificaron cuatro estrategias para el control de la NL

(Mejora del manejo del agua (IWM, siglas en inglés), Mejora del manejo de fertilizantes (IFM), Uso de cultivos cubierta (UCC) y Mejora de la tecnología de fertilizantes (IFT)) que fueron divididas en tratamientos (Tabla 1). Cada observación fue asignada a un tratamiento y estrategia.

Tabla 1. Categorías (estrategias y tratamientos) obtenidas de los artículos analizados para controlar la lixiviación de nitratos en sistemas de regadío

Estrategias	Tratamientos
Mejora del manejo del agua (IWM)	Ajustar aplicación agua a necesidades cultivo Riego deficitario controlado Mejora programación del riego Mejora tecnología del riego Suelos acolchados
Mejora del manejo de fertilizantes (IFM)	Uso de la dosis de fertilizante recomendada Reducción en la dosis recomendada Optimizar momento aplicación del fertilizante Fertirrigación
Uso cultivos cubierta (UCC)	Reemplazar barbecho por CC no-leguminosa Remplazar barbecho por CC leguminosa
Mejora tecnología de los fertilizantes (IFT)	Fertilizantes de liberación controlada Inhibidores de la nitrificación

Los datos fueron analizados empleando técnicas de MA para estudiar la respuesta de NL y las otras variables a las estrategias y tratamientos identificados. Para cada observación los datos se presentaron como la media de las repeticiones del experimento de campo y el número de repeticiones no fue utilizado para ponderar. El tamaño del efecto (effect size, en inglés) de cada observación fue calculado como la respuesta relativa ($r = X_e/X_c$), siendo X_e la media del tratamiento y X_c la media del testigo para cada variable. Para normalizar la distribución y realizar el MA, se empleó la raíz cuadrada de la respuesta relativa, $R = \sqrt{r} = \sqrt{X_e/X_c}$. Los valores transformados fueron empleados para comparar los tamaños del efecto entre todas las estrategias y tratamientos, para posteriormente obtener el valor medio del tamaño del efecto mediante la transformada inversa (Johnson and Curtis, 2001). Para cada variable de interés y categoría de datos, se calcularon tamaños medios del efecto e intervalos de confianza (CI) del 95% en torno a los valores medios mediante un proceso de remuestro (bootstrapping, en inglés) de 5000 iteraciones. Los tamaños medios fueron considerados significativamente diferentes de cero si el CI del 95% no solapaba el valor cero, y diferentes entre si cuando los respectivos CI no se solapaban (Hedges et al., 1999). También se analizó el efecto de los factores ambientales y de manejo del cultivo.

Se creó una submuestra de la base de datos para analizar con detalle la relación entre NL y Nap. La submuestra contenía 150 pares de datos. Las aplicaciones de fertilizante se dividieron en seis grupos: no aplicación, cuatro grupos cada 100 kg N ha^{-1} aplicados hasta 400 kg N ha^{-1} , y un sexto grupo para $\text{Nap} > 400 \text{ kg N ha}^{-1}$. Para intentar relacionar Nap y la demanda del cultivo, en la misma submuestra de datos la fracción de la dosis de fertilizante recomendada fue calculada dividiendo Nap por la dosis recomendada para el estudio y los datos fueron divididos en

cinco grupos. El rendimiento relativo se calculó dividiendo Y a un Nap específico por Y a la dosis recomendada para ese experimento. Para todos los grupos de las submuestras de datos se calcularon las medias y los CI del 95% mediante un proceso de remuestro como el anteriormente indicado.

3.- Resultados

La literatura científica seleccionada representa una base de datos global, siendo la distribución geográfica como sigue: América del Norte (44%), Europa (38%), Asia (14%) y América del Sur (4%). Las observaciones de NL de la estrategia IWM (82) e IFM (106) dominaban la literatura (Fig. 1). El uso de cultivos cubierta fue la única estrategia basada en diversificación de cultivos en el MA. La IFT recibió una atención moderada en la literatura pero la gran mayoría de los artículos relacionados con esta estrategia pasaron los criterios de calidad establecidos. El efecto de los factores medioambientales fue de escasa relevancia en nuestra base de datos, por lo que nos centramos en el tamaño del efecto de las estrategias de manejo para el control de NL.

Todas las estrategias de manejo seleccionadas para el MA redujeron NL pero con distinto nivel de éxito (Fig. 1). El mayor efecto fue alcanzado por IWM (58%) que fue significativamente diferente de las otras estrategias. La IFM (39%) tuvo mayor efecto que IFT (24%), y el efecto de UCC estuvo entre ambas estrategias. El potencial de las prácticas agrarias para reducir NL se pone de manifiesto con estos resultados, siendo el correcto manejo del agua la más efectiva. Dentro de IWM, el tratamiento ajustar la aplicación del agua a las necesidades del cultivo tuvo el mayor efecto (Fig.2a). El riego deficitario, la mejora de la programación, la mejora de la tecnología del riego y el uso de acolchados también disminuyeron NL pero en menor medida.

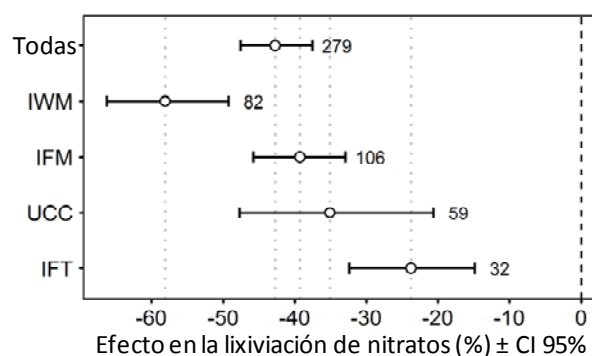


Fig. 1. Efecto del conjunto de las prácticas de manejo (Todas) y efecto del de cada estrategia en la reducción de la lixiviación de nitratos expresado en porcentaje con respecto al control. IWM: Mejora del manejo del agua; IFM: Mejora del manejo del fertilizante; UCC: Uso de cultivos cubierta; IFT: Mejora tecnología de los fertilizantes. Se muestran los valores medios del tamaño del efecto y CI 95%. El número de observaciones se muestra a la derecha de los CI

Utilizar la dosis recomendada de fertilizante redujo NL en un 43% con respecto a aplicaciones excesivas (Fig. 3). Una reducción en la dosis recomendada produjo una disminución adicional de NL del 50%. El número de observaciones en estos dos tratamientos fue cerca de la mitad de las de la estrategia IFM y suficientes como para realizar un análisis más detallado que permita comprender mejor la relación entre el ajuste de la dosis y NL. La NL media de los tratamientos que no recibieron fertilizante fue 16 kg NO₃-N ha⁻¹ en el período de medida, después aumentó con Nap hasta una media de 106 kg NO₃-N ha⁻¹ para aplicaciones mayores a 400 kg N ha⁻¹ (Fig. 4a). Hubo un aumento lineal de NL hasta aplicaciones igual a la dosis recomendada, pero cuando Nap fue mayor que la dosis recomendada las pérdidas de NL se potenciaron (Fig. 4b). Sorprendentemente, la fertirrigación, práctica que permite ajustar la aplicación del fertilizante a la demanda del cultivo, no tuvo un efecto significativo en el control de NL (Fig. 3a).

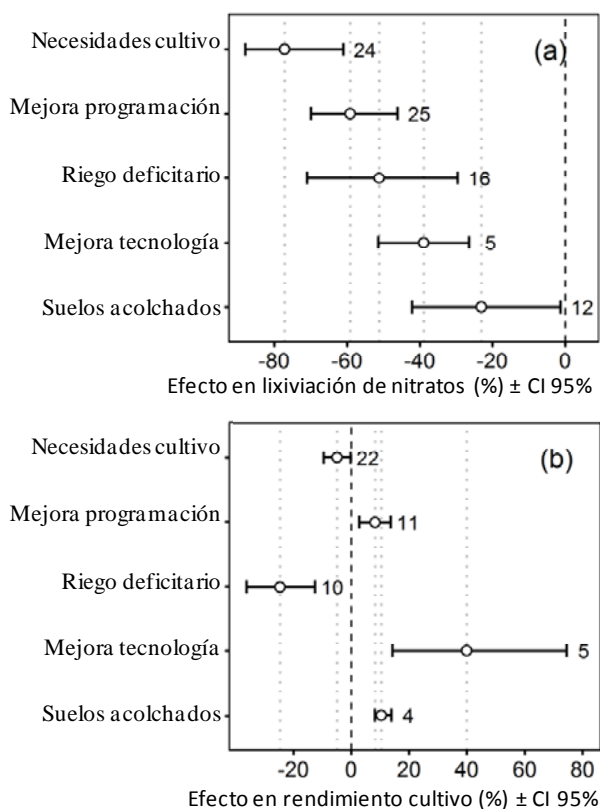


Fig. 2. Efecto de la estrategia IWM y de los tratamientos de la misma en la lixiviación de nitratos (a) y en el rendimiento del cultivo (b) expresado en porcentaje con respecto al control. Se muestran los valores medios del tamaño del efecto y CI 95%. El número de observaciones se muestra a la derecha de los CI.

El efecto de UCC dependió del tipo de CC (Fig. 5a). Mientras reemplazar el barbecho por un CC no leguminosa disminuyó NL en un 50%, reemplazarlo por una leguminosa no redujo NL. Los resultados para las leguminosas CC no son concluyentes, con un aumento de NL en nueve de las 20

observaciones y un descenso en las otras once.

De media, la estrategia IFT disminuyó NL en un 27%, no habiendo diferencia entre los dos tratamientos (Fig. 6a). El conjunto de la estrategia IFT no tuvo un efecto en Y, pero la aplicación de fertilizantes de liberación lenta puede incluso producir una pequeña disminución (Fig. 6b).

Mejorar el manejo del agua no redujo Y con respecto al riego excesivo (Fig. 2b). Mientras que los cultivos en riego deficitario disminuyeron su Y, la programación adecuada de la aplicación de agua lo aumentó. El acolchado del suelo tuvo un efecto beneficioso en Y.

El Y medio de los tratamientos que no recibieron fertilizante nitrogenado fue del 63% del obtenido en los que recibieron la dosis recomendada (Fig. 4b). Por encima de la dosis recomendada, sólo se observó una ligera respuesta en el rendimiento a incrementos de Nap. Como consecuencia, en la estrategia IFM el mayor efecto en NUE se observó para el tratamiento Uso de la dosis de fertilizante recomendada. La reducción de Nap con respecto a la dosis recomendada permitió un mayor aumento en NUE. Los tratamientos Fertirrigación y Optimización del momento de aplicación del fertilizante no tuvieron un efecto en el Y o en NUE. Detalles de los resultados de NUE pueden encontrarse en Quemada et al. (2013).

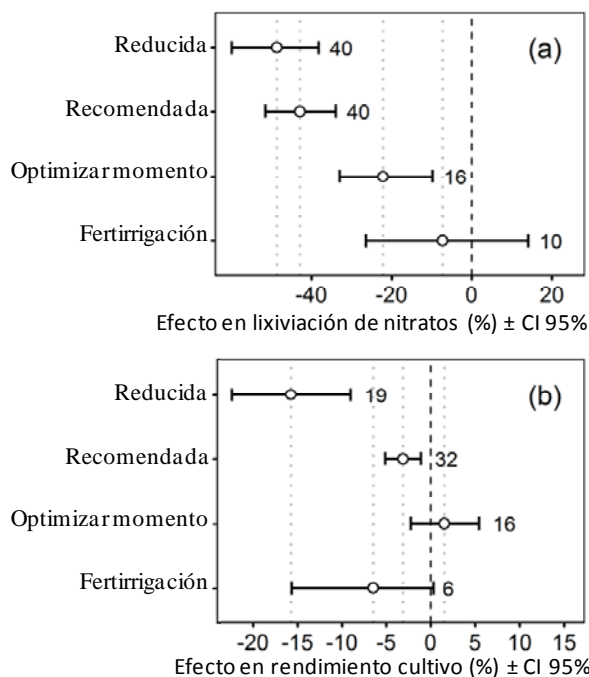


Fig. 3. Efecto de los tratamientos de la estrategia Mejora del manejo de fertilizantes (IFM): Uso de la dosis de fertilizante recomendada (Recomendada), Reducción en la dosis recomendada (Reducida), Optimizar momento aplicación del fertilizante (Optimizar momento) y Fertirrigación en el control de la lixiviación de nitratos (a) y en el rendimiento del cultivo (b). Se muestran los valores medios del tamaño del efecto y CI 95%. El número de observaciones se muestra a la derecha de los CI.

En los experimentos de los artículos seleccionados se

estudiaban un total de 16 cultivos de producción diferentes, de los cuales 63% fueron asignados a cereales y 37% a hortalizas. El tamaño del efecto de las estrategias para el control de NL fue mayor para los cereales (48%) que para las hortalizas (33%). Estos resultados deben ser tomados con precaución ya que la clasificación de los cultivos fue simplificada y en ocasiones aparecen intercalados en rotaciones cereales y cultivos hortícolas.

Adoptar una estrategia para el control de NL tuvo un efecto positivo en todos los tipos de riego. Los efectos mayores se alcanzaron cuando las estrategias se implementaron en el riego por superficie y los menores cuando se hicieron en riego por goteo, estando el riego por aspersión y los pivotes en una situación intermedia.

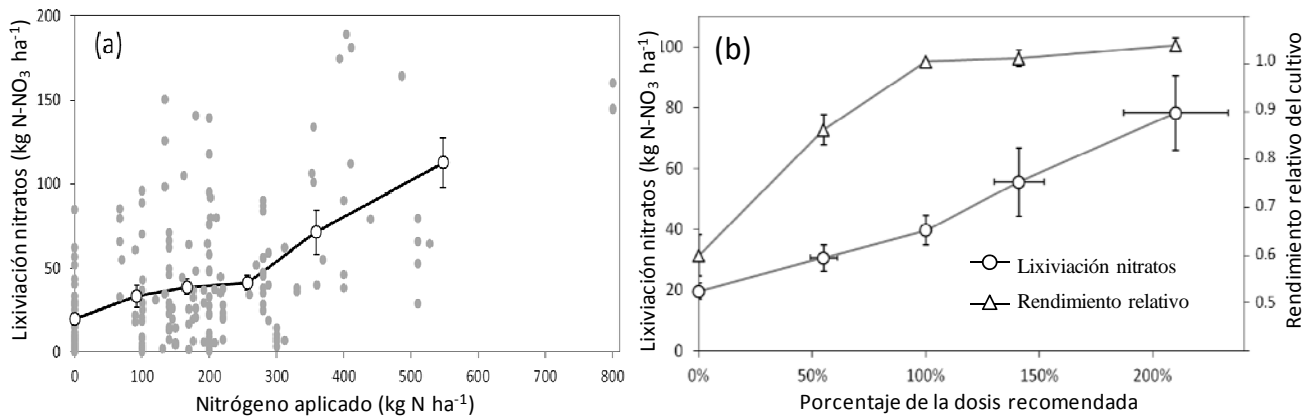


Fig. 4. Lixiviación de nitratos de las observaciones de los tratamientos Uso de la dosis de fertilizante recomendada y Reducción en la dosis recomendada frente al nitrógeno aplicado como fertilizante (a) y al porcentaje de la dosis recomendada (b). Los puntos del gráfico (a) representan los datos originales de todas las observaciones y los círculos muestran los valores medios para cada grupo de dosis de aplicación de fertilizantes. El gráfico (b) muestra la media de la lixiviación de nitratos (círculos) y rendimiento relativo del cultivo (triángulos) para cada grupo de porcentaje de dosis recomendada. Las barras de cada gráfico representan los CI 95% en torno a la media del tamaño del efecto.

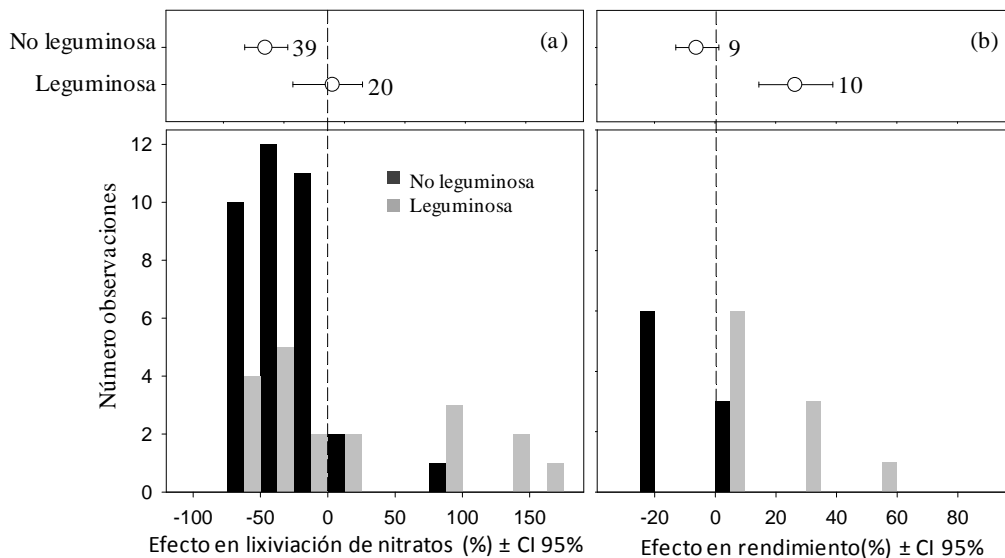


Fig. 5. Efecto de utilizar leguminosas y no leguminosas como cultivos cubierta en la lixiviación de nitratos (a) y en el rendimiento (b). Los gráficos superiores muestran los valores medios del tamaño del efecto y CI 95%. Los gráficos inferiores muestran la distribución de la frecuencia de las observaciones para cada rango de porcentaje con respecto al control.

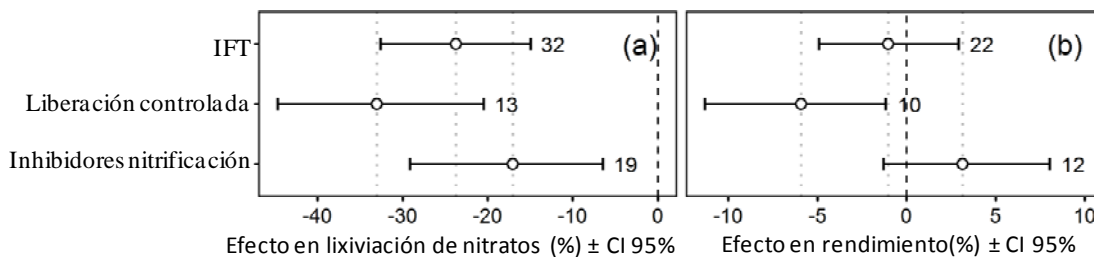


Fig. 6. Efecto de la estrategia Mejora tecnología de los fertilizantes (IFT) y los tratamientos Fertilizantes de liberación controlada y con inhibidores de la nitrificación en la lixiviación de nitratos (a) y en el rendimiento del cultivo (b). Se muestran los valores medios del tamaño del efecto y CI 95%.

4.- Discusión

La reducción en NL obtenida por Ajustar la aplicación de agua a las necesidades del cultivo depende del nivel original del riego excesivo, pero de acuerdo a nuestros resultados es el tratamiento con un efecto mayor y puede llevar a reducciones en NL superiores al 80%. En los seis artículos con este tratamiento, el riego excesivo fue entre el 10% y el 30% superior a las necesidades del cultivo. La aplicación de agua en exceso es una práctica común para compensar la variabilidad del suelo y asegurar que el rendimiento potencial puede alcanzarse en toda la finca, pero como facilita las pérdidas de N frecuentemente se acompaña de fertilización nitrogenada excesiva, lo que conduce a un círculo vicioso con efectos medioambientales perjudiciales (Diez et al., 2000). La eficiencia de uso del agua y el N estuvieron altamente relacionadas en todos los artículos de este tratamiento y ajustar el riego a las necesidades del cultivo fue una buena estrategia para minimizar NL sin sacrificar Y. En algunos de los artículos se observó que al ajustar el riego en exceso disminuía Y por un aumento de la salinidad en la zona radical, lo que pone de manifiesto la necesidad de desarrollar técnicas que permitan controlar NL sin que se acumulen sales en los horizontes superficiales del suelo (Gabriel et al. 2012a).

El riego deficitario, una práctica común donde el agua es escasa, permite una reducción adicional en NL con respecto a ajustar el riego a las necesidades del cultivo. Cuando el Y se reduce por el riego deficitario, la aplicación de fertilizante N debe ser también reducida para ajustarse a la menor demanda del cultivo; si no, se favorecería la acumulación de N residual en el suelo y el riesgo de aumentar NL. Incluso cuando la aplicación de agua no fue reducida con respecto a las necesidades del cultivo, la Mejora de la programación del riego permitió controlar NL y aumentar Y. Esta práctica fue particularmente importante en cultivos hortícolas, en los que la frecuencia de riego fue un factor muy relevante para asegurar la supervivencia de las plantas y controlar NL durante el periodo de establecimiento del cultivo (Vázquez et al., 2006). Una reducción adicional en NL puede ser lograda con un uso apropiado de sensores del estado hídrico del suelo o de la planta, que pueden permitir mejorar el ajuste entre la aplicación de agua y la demanda del cultivo (Zotarelli et al., 2011).

El acolchado, aparte de otras ventajas agronómicas, favorece la absorción de N por el cultivo debido a un aumento de la temperatura del suelo y la eficiencia de uso del agua y N, lo que conduce a una reducción de NL (Vázquez et al., 2005). Además, el acolchado evita la infiltración directa de la lluvia a través del surco o la meseta durante el crecimiento del cultivo, lo que podría ocasionar un aumento de NL (Romic et al., 2003).

La estrategia IFM alcanzó una reducción de NL de casi un 40%, lo que hace de ella una prioridad adicional al implementar políticas destinadas al control de la contaminación por nitratos. La aplicación de fertilizante N a un sistema de regadío aumentó NL, incluso cuando se aplicó a la dosis recomendada NL se dobló al compararlo con el testigo no fertilizado. La mejor relación entre Y y NL se obtiene cuando se aplica la dosis de fertilizante recomendada. Valores por debajo de la dosis recomendada, a la vez que reducen NL también reducen Y. Fertilizaciones por encima de la dosis recomendada llevaban a un aumento en la lixiviación sin producir aumentos significativos de Y. Es recomendable para los artículos futuros reportar el N absorbido por el cultivo y los diferentes aportes de N (agua de riego, suelo, deposición) al estudiar NL, de forma que se puedan realizar análisis basados en el N en exceso (N surplus, en inglés) además de de los basados en la dosis recomendada (Perego et al., 2012).

La fertirrigación no redujo NL en comparación con las aplicaciones convencionales de fertilizante granulado en cobertera. La fertirrigación ha sido frecuentemente recomendada en cultivos hortícolas (normalmente asociada a riego por goteo) con el objetivo de aumentar NUE y reducir las pérdidas, debido a una mejora en la sincronización entre la disponibilidad de N y la absorción del cultivo (Stark et al. 1983). Sin embargo, en nuestro estudio para crear una observación seleccionamos pares de datos en los que se aplicaban iguales cantidades de agua y N, y en la mayoría de casos no se observó un efecto significativo de la fertirrigación en NL, Y o NUE. Nuestros estrictos criterios de selección aplicados a los experimentos de fertirrigación podría haber resultado en una subestimación del potencial de esta tecnología. Son necesarios estudios comparativos entre fertirrigación y fertilización convencional que permitan obtener el máximo beneficio de estas técnicas.

La reducción de NL que resultó de reemplazar el barbecho por un CC puede estar relacionada con uno o varios de los siguientes factores: el aumento de la evapotranspiración, la disminución de la percolación por debajo del sistema radical, un cambio en la concentración de nitrato en la solución del suelo y con el N absorbido por el CC (Gabriel et al., 2012b). Como era de esperar, las no leguminosas tuvieron mayor efecto que las leguminosas y sus resultados fueron consistentes. Sin embargo, en la mayoría de los estudios al reemplazar el barbecho por una leguminosa aumentó la retención de N por el suelo sin que se produjese un aumento de NL, lo que sugiere un aumento del N orgánico en la materia orgánica del suelo. De acuerdo con este proceso, los resultados de este MA muestran que el uso de leguminosas como CC en sistemas de regadío puede aumentar el rendimiento y NUE sin aumentar el riesgo de NL, siempre que los cultivos siguientes absorban el N liberado por el CC (Gabriel et al., 2011).

El uso de IFT también contribuyó a reducir NL, aunque de manera moderada. La principal razón fue la menor liberación de nitrato a la solución del suelo que se alcanza con estas nuevas tecnologías en comparación con los fertilizantes convencionales. La eficiencia de IFT es normalmente mayor en condiciones que favorecen un elevado drenaje o altos insumos de fertilizante N (Cui et al., 2011). En ocasiones el uso de IFT produjo una reducción del rendimiento, al no sincronizar bien la demanda de N por parte de la planta con el ritmo de liberación del nutriente. Actualmente los precios para los nuevos fertilizantes es mayor que el de los convencionales (Trenkle, 2010). La diferencia depende del precio de la materia prima, pero mientras que los fertilizantes con inhibidores de la nitrificación están en un rango atractivo para el agricultor, los de liberación lenta sólo son rentables en la agricultura en ocasiones muy excepcionales.

Uno de los objetivos del MA fue el aprender de la experiencia en áreas en las que ya se está utilizando el riego para evitar repetir los problemas de contaminación ocasionados en nuevas zonas de regadío o en zonas que serán desarrolladas en el futuro. Siempre se debe tener cuidado al extrapolar los resultados, pero el MA aumenta la confianza para extrapolar resultados con respecto a los estudios individuales (Jeffery et al., 2011). La inclusión de datos de cuatro zonas climáticas diferentes y de suelos con texturas variadas permite la reducción del sesgo (bias, en inglés) y fortalecer la fiabilidad de los resultados. Sin embargo, otras características del suelo que podrían ser relevantes como profundidad, pedregosidad o contenido de material orgánico no se incluyeron en el MA. Igualmente, características topográficas o hidrológicas de la zona de estudio eran rara vez descritas con detalle en los artículos y no fueron incluidas. En consecuencia, se debe tener cuidado a la hora de extrapolar los resultados y prestar atención a las condiciones e información local.

5.- Conclusiones

Este estudio ha resaltado el potencial de cuatro estrategias

diferentes para reducir NL en los sistemas de regadío, proporcionando información para el diseño de medidas destinadas a mitigar la contaminación difusa por nitratos. También se analizó el impacto de estas estrategias en el rendimiento de los cultivos, proporcionando una indicación sobre las implicaciones económicas para los agricultores.

Las prácticas relacionadas con la Mejora del manejo del agua ofrecen el mayor potencial para reducir NL y el ajuste de la cantidad de agua aplicada a las necesidades del cultivo debe ser la primera técnica de manejo a implementar. Reducciones adicionales en NL pueden conseguirse mediante mejoras en la programación del riego. También pueden lograrse mediante el riego deficitario pero esto podría conllevar a una reducción en el rendimiento del cultivo.

La Mejora del manejo de fertilizantes reduce NL en un 40% de media comparando con manejos en los que no se había optimizado el uso de los fertilizantes N, lo que indica que debe ser también una prioridad cuando se diseñen políticas destinadas a mitigar NL. Nuestros resultados sugieren que un buen manejo del agua combinado con la aplicación de la dosis recomendada de fertilizantes debería ser además la opción más rentable para el agricultor y por lo tanto se convierte en una combinación doblemente beneficiosa.

Otras estrategias que proporcionan beneficios en la reducción de NL pueden suponer un coste para el agricultor. El uso de CC leguminosas no reduce NL con respecto al barbecho pero aumenta Y y NUE, abriendo la oportunidad de reducir la aplicación de fertilizantes. El uso de CC no leguminosas ofrece un buen potencial con reducciones de NL del 50% con respecto al barbecho. Sin embargo, la implantación de los CC requiere un trabajo adicional y los costes de la semilla, que pueden no ser compensados por las pequeñas ganancias en rendimiento proporcionadas por los CC. De forma similar, la utilización de nuevas tecnologías de fertilizantes, como inhibidores de la nitrificación o liberación lenta, mientras que reducen NL entre un 20-30% comparado con los fertilizantes convencionales, pueden suponer un costo para el agricultor. Los fertilizantes de liberación lenta pueden reducir el rendimiento ligeramente mientras que los que contienen inhibidores de la nitrificación no producen un aumento elevado comparado con los convencionales, por lo que la rentabilidad del uso de estos nuevos fertilizantes queda restringida a condiciones muy concretas.

En conjunto, recomendamos una aproximación secuencial para la selección de estrategias destinadas al control de NL en sistemas de regadío. La aproximación inicial debe basarse en una optimización del uso de agua y fertilizantes. Técnicas más innovadoras, como el uso de CC o fertilizantes de nuevas tecnologías, pueden permitir reducciones adicionales de NL pero no siempre resultan en un beneficio económico para el agricultor. Finalmente, los costes y beneficios de las estrategias para la reducción de NL deben ser calculados para un sistema de cultivo específico, de forma que se asegure que se realice la mejor elección para el agricultor y el medio ambiente.

Agradecimientos. Este trabajo fue cofinanciado por el proyecto N-TOOLBOX (N-TOOLBOX-227156) de la Comisión Europea en el 7 programa Marco, por la CICYT (proyecto AGL2011-24732) y por la Comunidad de Madrid (proyecto S2009/AGR-1630).

6.- References

- Diez, J.A., R. Caballero, R. Roman, A. Tarquis, M.C. Cartagena, y A. Vallejo, 2000. Integrated fertilizer and irrigation management to reduce nitrate leaching in Central Spain. *J. Environ. Qual.* 29, 1539-1547.
- Cui, M., X. Sun, C. Hu, H.J. Di, Q. Tan, y C. Zhao, 2011. Effective mitigation of nitrate leaching and nitrous oxide emissions in intensive vegetable production systems using a nitrification inhibitor, dicyandiamide. *J. Soils Sedim.* 11, 722-730.
- Gabriel, J.L., P. Almedros, C. Hontoria, y M. Quemada, 2012a. The role of cover crops in irrigated systems: Soil salinity and salt leaching. *Agric. Ecosyst. Environ.* 158, 200-207.
- Gabriel, J.L., R. Muñoz-Carpena, y M. Quemada, 2012b. The role of cover crops in irrigated systems: Water balance, nitrate leaching and soil mineral nitrogen accumulation. *Agric. Ecosyst. Environ.* 155, 50-61.
- Gabriel, J.L. y M. Quemada, 2011. Replacing bare fallow with cover crops in a maize cropping system: Yield, N uptake and fertiliser fate. *Eur. J. Agron.* 34, 133-143.
- Hedges, L.V., J. Gurevitch, y P.S. Curtis, 1999. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. *Ecology.* 80, 1150-1156.
- Isidoro, D., D. Quilez, y R. Aragües, 2006. Environmental impact of irrigation in La Violada district (Spain): II. Nitrogen fertilization and nitrate export patterns in drainage water. *J. Environ. Qual.* 35, 776-785.
- Jeffery, S., F.G.A. Verheijen, M. Van Der Velde, y A.C. Bastos, 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* 144, 175-187.
- Johnson, D.W. y P.S. Curtis, 2001. Effects of forest management on soil C and N storage: Meta analysis. *Forest Ecol. Manag.* 140, 227-238.
- Perego, A., A. Basile, A. Bonfante, R. De Mascellis, F. Terribile, S. Brenna, y M. Acutis, 2012. Nitrate leaching under maize cropping systems in Po Valley (Italy). *Agric. Ecosyst. Environ.* 147, 57-65.
- Quemada, M., M. Baranski, M.N.J. de Lange, A. Vallejo, y J.M. Cooper, 2013. Meta-analysis of strategies to control nitrate leaching in irrigated agricultural systems and their effects on crop yield. *Agric. Ecosyst. Environ.* 174, 1-10.
- Romic, D., M. Romic, J. Borosic, y M. Poljak, 2003. Mulching decreases nitrate leaching in bell pepper (*Capsicum annum* L.) cultivation. *Agr. Water Manage.* 60, 87-97.
- Stark, J.C., W.M. Jarrell, J. Letey, y N. Valoras, 1983. Nitrogen use efficiency of trickle-irrigated tomatoes receiving continuous injection of N. *Agron. J.* 75, 672-676.
- Trenkel, M.E., 2010. *Slow- and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Efficiency in Agriculture.* IFA, Paris, France.
- Vázquez, N., A. Pardo, M.L. Suso, y M. Quemada, 2005. A methodology for measuring drainage and nitrate leaching in unevenly irrigated vegetable crops. *Plant Soil.* 269, 297-308.
- Vázquez, N., A. Pardo, M.L. Suso, y M. Quemada, 2006. Drainage and nitrate leaching under processing tomato growth with drip irrigation and plastic mulching. *Agric. Ecosyst. Environ.* 112, 313-323.
- Zotarelli, L., M.D. Dukes, J.M.S. Scholberg, K. Femminella, R. Muñoz-Carpena, 2011. Irrigation scheduling for green bell peppers using capacitance soil moisture sensors. *J. Irrig. Drain. E-Asce.* 137, 73-81.