

EMR 1.0: Herramienta al servicio de la vigilancia agroambiental del regadío

Jesús Causapé Valenzuela

Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA)
Avda. Montañana 930. C.P: 50059 Zaragoza. Tf: 34-976716324, Fax: 34-976716335
E-mail: jcausape@aragon.es; Web: <http://acebo.pntic.mec.es/jcav0026/>

Resumen

El carácter difuso de la contaminación agraria de regadío dificulta su cuantificación y asignación a un determinado territorio. Los objetivos de este trabajo son unificar criterios metodológicos para la evaluación agroambiental y proponer índices que cuantifiquen la contaminación inducida desde el regadío.

Para ello, se ha desarrollado una herramienta informática denominada EMR (Evaluador Medioambiental de Regadíos) que evalúa la calidad del riego e impacto agroambiental en base a balances de agua, sales y nitrato en cuencas hidrológicas de regadío. El comportamiento de los índices propuestos es analizado a partir de datos registrados en varios regadíos de la cuenca del Ebro.

Los Índices de Contaminación por Sales (ICS) y Nitrato (ICN) están basados en la masa unitaria de contaminantes exportada corregida por condicionantes "naturales y socioeconómicos" de los regadíos. ICS e ICN se relacionan con el aprovechamiento del agua y del nitrógeno aportado en la fertilización, factores claves para minimizar la contaminación.

ICS e ICN admiten una mayor masa de contaminantes exportados en los regadíos con mayor salinidad natural y necesidades de fertilización, lo que no impide que exijan por igual la adecuada gestión de todos los regadíos. EMR se constituye como una herramienta de fácil manejo al servicio de la vigilancia agroambiental del regadío.

Palabras clave: Balance de agua, contaminación por sales y nitratos, índices agroambientales.

Summary

EMR 1.0: Tool at the service of environmental surveillance of irrigated land

Non point agrarian contamination makes its quantification and assignment to a specific territory difficult. The objectives of this work are to unify methodological criteria for agro-environmental evaluation and to propose indices to quantify irrigation-induced contamination.

To this end, a computer programme called Irrigation Land Environmental Evaluation Tool (in Spanish EMR; <http://acebo.pntic.mec.es/jcav0026/investigacion/EMR.htm>) has been developed which evaluates the quality of irrigation and agro-environmental impact based on water, salt and nitrate balances in hydrological irrigation basins. The behaviour of the proposed indices is analysed using data registered in various irrigation districts in the Ebro valley (Spain).

Salt and Nitrate Contamination Indices (SCI and NCI respectively) are based on the unitary mass of exported pollutants corrected by "natural and socioeconomic" conditions of irrigation districts evaluated. SCI and NCI are related to water and nitrogen use, key factors for minimizing contamination.

SCI and NCI admit a greater mass of pollutants exported in the disadvantaged irrigation districts, which doesn't prevent equally appropriate management being required in all irrigation districts evaluated. EMR is a user-friendly tool at the service of agro-environmental surveillance of irrigation land.

Key words: Water balance, salt and nitrate pollution, agro-environmental indices.

Introducción

El carácter difuso de la contaminación agraria dificulta su cuantificación y asignación a un determinado territorio, por ello, la evaluación y vigilancia agroambiental del regadío no es una tarea sencilla. No obstante, la pérdida de agua y contaminantes en desagües agrícolas puede ser asignada a la cuenca hidrológica del desagüe correspondiente, y por tanto, asociada a sus características climáticas, geológicas y agronómicas, ofreciendo el diagnóstico agroambiental del regadío evaluado.

Para asegurar que el drenaje medido corresponde a la superficie agraria asignada, es necesario efectuar balances hídricos en los cuales las entradas de agua deben ser iguales a las salidas. Un correcto cierre del balance hídrico y la asignación de concentraciones de contaminantes a cada uno de sus componentes, permite cuantificar tanto la calidad del riego como el impacto agroambiental inducido por un determinado regadío.

Esta metodología ha sido aplicada con éxito en diferentes regadíos de la cuenca del Ebro en el marco de proyectos de investigación (Tedeschi *et al.*, 2001; Lasanta *et al.*, 2002; Cavero *et al.*, 2003; Causapé *et al.*, 2004a-b; Isidoro *et al.*, 2006a-b). Sin embargo, bajo una misma metodología general surgen versiones individualizadas para cada caso de estudio concreto. La escala de trabajo, presencia de flujos subterráneos, sistemas de riego implantados y disponibilidad de datos son algunos de los muchos factores que condicionan la alta variabilidad metodológica, lo que dificulta el contraste entre los resultados obtenidos en los distintos regadíos estudiados.

Por otro lado, la legislación vigente en la Unión Europea (EU, 1991; EU, 1998; EU, 2000; EU, 2006) tan solo hace referencia a niveles de concentración de contaminantes en las aguas, a pesar de que el estudio de regadíos (Causapé *et al.*, 2006) ha demostrado que la mejora en la eficiencia del riego puede pro-

vocar un incremento en la concentración del drenaje y una disminución en las masas de contaminantes exportados.

La masa de contaminantes exportados en el drenaje es el parámetro que debería tenerse en cuenta a la hora de proteger los sistemas receptores de los retornos de riego. Por ello, la Agencia Estadounidense para la Protección del Medio Ambiente está definiendo el Total Maximum Daily Load (TMDL) como el máximo de contaminantes que puede recibir cada masa de agua para no superar los estándares de calidad y comprometer su uso (www.epa.gov/). Al margen de la vulnerabilidad que tengan los sistemas receptores de los retornos de riego, la legislación debería promover la adecuada gestión de los regadíos mediante el cumplimiento de indicadores agroambientales basados en las masas de contaminantes exportados corregidas por factores desfavorables de origen natural o socioeconómico.

En definitiva, el elevado número de datos y la complejidad de cálculos desaniman la ejecución sistemática de estudios agroambientales. Frecuentemente, los organismos competentes en materia de aguas no disponen de las herramientas ni criterios necesarios para evaluar agroambientalmente un regadío. Todo ello impide legislar correctamente la gestión de los regadíos, lo que esta provocando que a día de hoy no se exija unos niveles mínimos de aprovechamiento del agua, ni niveles máximos de contaminación inducida por el regadío.

Por tanto, los objetivos de este trabajo son: i) unificar criterios metodológicos para la evaluación agroambiental de regadíos presentándolos en una aplicación informática de fácil manejo denominada EMR (Evaluador Medioambiental de Regadíos); ii) proponer indicadores agroambientales de la contaminación por sales y nitrato inducida por el regadío y iii) analizar el comportamiento de los índices propuestos.

Descripción de EMR

EMR está programado en JAVA (www.sun.com) y, aunque el instalador está preparado para un entorno Windows, la aplicación es multiplataforma, pudiéndose usar en Linux o en cualquier otro sistema operativo donde pueda existir una máquina virtual JAVA. Los requisitos técnicos mínimos para ser ejecutados son: a) un Procesador Pentium IV o superior, b) Memoria RAM: 256 MB y c) Disco duro: 25 MB.

EMR se distribuye mediante un archivo instalador llamado "InstalarEMR.exe" que puede descargarse gratuitamente junto al manual de usuario (Causapé y Pérez, 2007) desde la página web <http://acebo.pntic.mec.es/jcav0026/investigacion/EMR.htm>

EMR ejecuta balances diarios de agua y cuantifica la masa de contaminantes exportados en el drenaje (sales y nitrato). En base a ello, presenta agrupaciones temporales de los balances (diarias, mensuales, trimestra-

les, semestrales, anuales y para cualquier otro periodo seleccionado por el usuario) y calcula una serie de indicadores de la calidad del riego e impacto ambiental del regadío.

Para facilitar su uso, los ficheros de entrada y salida del programa se proporcionan en formato Excel existiendo unas plantillas que actúan de guía a la hora de afrontar un proyecto. Una vez construidos los ficheros de entrada de datos, el usuario simplemente debe asignarlos a su proyecto EMR e ir solicitando las salidas de datos que le interesen.

Metodología

El primer paso para la evaluación medioambiental de un regadío es tener perfectamente delimitado el regadío a evaluar y en función de ello proporcionar los datos necesarios. El regadío a evaluar puede subdividirse en varias "zonas" (fig. 1) cuya definición

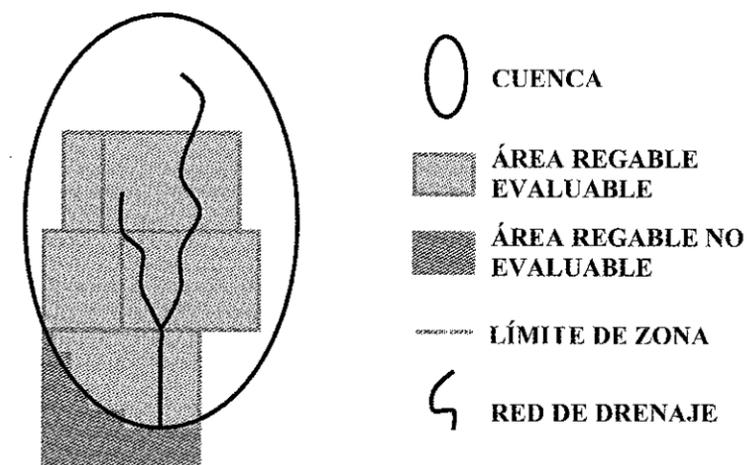


Figura 1. Croquis de una hipotética cuenca en la que el área regable a evaluar se reparte en cinco "zonas", de las cuales parte de una de ellas se localiza en el exterior de la cuenca y por tanto no es evaluable en el proyecto.

Figure 1. Outline of a hypothetical basin in which the irrigation land for evaluation is distributed into five "subareas", with part of one of them located outside the basin and therefore not assessable in this project.

es ampliamente variable ya que una "zona" se puede corresponder a toda una comunidad de regantes, a un sector de riego, a una parcela, etc.

Para cada "zona", EMR solicita información geográfica (coordenadas) y agronómica acerca de los cultivos que contiene, coeficientes de cultivo (K_c) para la estimación de la evapotranspiración potencial (ET_c), capacidad de retención de agua disponible para las plantas en los suelos (CRAD), y volúmenes de riego aplicado, tanto totales (R) como únicamente por aspersión.

Por otro lado, el programa solicita información sobre las coordenadas geográficas de las estaciones climáticas implicadas en el proyecto además de sus datos de precipitación (P), evapotranspiración de referencia (ET_0), velocidad del viento a 2 m del suelo (v) y humedad relativa a 1,5 m de la superficie del suelo (HR).

Las coordenadas geográficas de las estaciones climáticas y zonas implicadas en el proyecto son utilizadas por EMR para interpolar las variables climáticas en cada "zona" mediante la técnica de la inversa del cuadrado de la distancia (Isaaks y Srivastava, 1989) donde, el dato climático para una determina "zona" (X_z) obtenido a partir de n estaciones climáticas es igual al sumatorio de la variable climática (X_i) dividida por la distancia de cada estación climática al centro geográfico de la "zona" (d_i) al cuadrado, partido por la suma de las inversas de esas mismas distancias al cuadrado.

$$X_z = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}}; \text{ siendo } d_i^2 = (x_i - x_z)^2 + (y_i - y_z)^2$$

La precipitación constituirá una entrada directa al balance mientras que la ET_0 se utilizará para estimar la evapotranspiración

potencial (ET_c) como $ET_c = ET_0 K_c$ (Allen et al., 1998). La velocidad del viento a 2 metros sobre la superficie (v, m/s) y la humedad relativa a 1,5 m sobre el suelo (HR, %) serán utilizadas para estimar el porcentaje de Pérdidas por Evaporación y Arrastre del riego por aspersión (PEA, %) calculadas según la relación encontrada por Salvador (2003):

$$PEA (\%) = 20,34 + 0,214 v^2 - 2,29 \cdot 10^{-3} HR^2$$

Con esta información EMR es capaz de ejecutar el Balance de Agua en el Suelo (BAS) para cada "zona" estimando diariamente el agua útil disponible para las plantas en el suelo (AU), la evapotranspiración real (ET_R) y el drenaje (D_{BAS}).

Para ello, al AU inicial, considerada como la mitad de la CRAD, le suma las entradas del día por el riego (R-PEA) y precipitación (P), y le resta la ET_c siempre y cuando haya suficiente AU en el suelo. Así pues, considera que la $ET_R = ET_c$ si $AU_{inicial} + P + R - PEA > ET_c$ y en caso contrario $ET_R = AU_{inicial} + P + R - PEA$ y el suelo queda al final del día con una humedad igual al punto de marchitez ($AU=0$).

En cambio, si $AU_{inicial} + P + R - PEA - ET_R > CRAD$, el programa interpreta que se ha sobrepasado la capacidad de campo del suelo obteniéndose un drenaje (D_{BAS}) igual a $D_{BAS} = AU_{inicial} + P + R - PEA - ET_R - CRAD$ y quedando el suelo al final del día a capacidad de campo ($AU = CRAD$). De este modo, EMR desarrolla el BAS un día tras otro hasta completar el periodo indicado por el usuario.

Adicionalmente y aprovechando la información generada en el BAS, EMR estima la Precipitación efectiva (P_{ef}) para cada día en cada "zona" considerando que si $P < CRAD + ET_R - AU$ entonces $P_{ef} = P$, y en caso contrario, $P_{ef} = CRAD + ET_R - AU$.

Esta aproximación no tiene en cuenta la existencia de flujos preferenciales en el suelo ni la escorrentía superficial que se

podiera generar. No obstante, se considera una aproximación suficientemente válida teniendo en cuenta que las parcelas agrícolas se suelen encontrar abancaladas y para que se genere escorrentía superficial son necesarias lluvias muy intensas.

EMR también estima el volumen de drenaje procedente del riego (D_R) considerando en los días y "zonas" con drenaje que si $AU + P - ET_R \geq CRAD$ entonces $D_R = R - PEA$ y en caso contrario $D_R = [R - PEA] - [CRAD - (AU + P - ET_R)]$. Esta estimación interpreta que durante un día siempre se produce antes la lluvia que el riego y en consecuencia prioriza el drenaje del riego sobre el de la lluvia teniendo en cuenta que hasta cierto punto el agricultor debe tener en cuenta las lluvias para decidir sobre la aplicación del riego, aunque evidentemente, la predicción del tiempo no es ni mucho menos infalible.

Una vez obtenida las entradas de agua por Riego (R) y Precipitación (P) así como una estimación de la Evapotranspiración Real (ET_R) y Pérdidas por Evaporación y Arrastre del riego por aspersión (PEA), EMR solicita información hidrológica de la cuenca en la que se incluye el regadío. Esta información se compone de los caudales superficiales y subterráneos de los Flujos Hídricos Entrantes (FHE) y Salientes al regadío (FHS), y del contenido de agua en el sistema a evaluar en el momento inicial y final del balance tanto en suelos como en acuíferos. Estos últimos datos son necesarios para calcular el almacenamiento de agua en el sistema y periodo evaluado (A).

Con todo ello, EMR ejecuta el balance hídrico del regadío estudiado por el cuál, las entradas ($E = R + P + FHE$) menos las salidas ($S = ET_R + PEA + FHS$) menos el almacenamiento (A) deberían ser nulas. EMR comprueba la bondad del balance hídrico mediante el cálculo del desbalance como $Desbalance = 200 [(E - S - A) / (E + S + A)]$, pudiendo admitirse como ade-

cuados para este tipo de estudios desbalances inferiores al 10%. Asimismo, el drenaje propio del sistema calculado como $D = FHS - FHE$ debería ser similar al drenaje estimado por BAS (D_{BAS}), particularmente, en periodos suficientemente extensos cuando el almacenamiento de agua en el sistema adquiere una menor importancia frente al resto de componentes.

Una vez comprobado que el balance hídrico es satisfactorio, el usuario esta en condiciones de asignar concentraciones de sales y nitrato a cada uno de los componentes del balance hídrico. Para las sales, el resultado de E-S-A no solo incluye los errores del balance si no también la cantidad de sales disueltas o precipitadas en el sistema.

En el caso del nitrato, E-S-A englobaría también los componentes del balance de nitrógeno no tenidos en cuenta como el nitrato aportado en la fertilización, la volatilización, la extracción de nitrógeno por los cultivos... En cualquier caso, EMR no pretende cerrar los balances de sales y nitrato si no principalmente cuantificar los contaminantes exportados en el drenaje como la diferencia entre los contaminantes exportados e importados a través de los flujos hídricos.

Cabe destacar, que EMR esta diseñado para adaptarse lo máximo posible a la disponibilidad de datos y a las distintas escalas de trabajo. Así por ejemplo, si en un determinado regadío no se disponen datos a nivel de parcela pueden definirse zonas a nivel de comunidad de regantes y si por ejemplo no se dispone de datos de riego diarios pueden introducirse datos mensuales. Evidentemente, una menor precisión en las entradas al programa contribuye a una pérdida de precisión en los resultados pero EMR permite la evaluación de cualquier sistema de regadío del que se disponga una mínima información.



Resultados

Evaluación de la calidad del riego

A partir de la información generada en el balance de agua en el suelo, EMR presenta como resultados las necesidades hídricas netas y cuatro índices que pretenden evaluar la calidad del riego para cada "zona" y para el total del sistema en cualquier periodo de tiempo definido por el usuario.

i) Las Necesidades Hídricas netas (NHn, mm) se calculan como la diferencia entre la Evapotranspiración Potencial (ET_c) más el Agua Útil contenida en el suelo al final del balance (AUF) y la Precipitación efectiva (Pef) más el Agua Útil contenida en el suelo al inicio (AUi).

$$NHn = (ET_c + AUF) - (AUi + Pef)$$

Las NHn estiman el volumen de agua de riego necesario para que los cultivos no sufran estrés hídrico y el suelo quede en las mismas condiciones de humedad que al inicio del balance.

ii) La Eficiencia en el Uso del Agua (EUA, %) se calcula como la Evapotranspiración Real (ET_R) más el Agua Útil almacenada en el suelo al final del periodo (AUF) entre la suma de recursos hídricos disponibles para las plantas, es decir, el Agua Útil inicial contenida en el suelo (AUi), la Precipitación efectiva (Pef), y el Riego (R).

$$EUA = \frac{ET_R + AUF}{AUi + Pef + R} \cdot 100$$

Este índice hace referencia al grado de aprovechamiento del agua por los cultivos y en gran parte está condicionado por el manejo del riego. Así, la pérdida de agua por evaporación y arrastre del riego por aspersión o por percolación profunda implicaría un descenso en la EUA.

iii) El Déficit Hídrico (DH, %) es calculado como la diferencia entre la Evapotranspiración Potencial (ET_c) y la Evapotranspiración Real (ET_R) dividido por la Evapotranspiración Potencial (ET_c).

$$DH = \frac{ET_c - ET_R}{ET_c} \cdot 100$$

Este índice evalúa en que grado el riego como complemento al AUi y a la Pef, ha sido incapaz de satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos. Cuanto mayor sea el DH mayor estrés hídrico habrán sufrido los cultivos como consecuencia de un manejo inadecuado del riego.

iv) La Fracción de Drenaje del riego (FD_R , %) se calcula como el porcentaje del Drenaje procedente del riego (D_R) respecto al volumen de Riego aplicado (R).

$$FD_R = \frac{D_R}{R} \cdot 100$$

Este índice evalúa las "pérdidas" de agua de riego por percolación profunda. Está condicionado por la dosis de riego en relación a la humedad del suelo en el momento de aplicar el riego.

v) La Eficiencia de Riego (ER, %) se calcula como uno menos la relación entre el volumen de agua de riego que sale del sistema sin ser evapotranspirada por los cultivos (Drenaje del riego- D_R más Pérdidas por Evaporación y Arrastre del riego por Aspersión-PEA) y el volumen de riego Aplicado (R).

$$ER = \left[1 - \left(\frac{D_R + PEA}{R} \right) \right] \cdot 100$$

Una teórica ER del 100% indicaría que todo el volumen de riego aplicado ha sido aprovechado para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos o acumulado en la reserva de agua en el suelo para su uso posterior.

Esta serie de índices permite evaluar la calidad del riego en cada una de las "zonas" y para el conjunto del regadío evaluado en un periodo de tiempo determinado. Así pues, una alta calidad del riego vendrá determinada cuando el DH y la FD_R sean nulos y la EUA y ER se aproximen al 100%. Si bien pueden ponerse en práctica técnicas de riego deficitario controlado que provocarían un DH intencionado, del mismo modo que en determinadas circunstancias, puede ser necesario aplicar el riego en exceso ($FD_R > 0$) para favorecer el lavado de sales con la consiguiente pérdida de EUA y ER.

Índices de evaluación agroambiental

Por último, EMR presenta los resultados de tres índices capaces de cuantificar el aprovechamiento del agua y la contaminación por sales y nitratos (principales problemas agroambientales) a nivel de todo el regadío evaluado. El Índice de Aprovechamiento del Agua (IAA) se calcula como uno menos el drenaje propio del sistema (D) más las Pérdidas por Evaporación y Arrastre (PEA) entre la Precipitación (P) más el Riego (R).

$$IAA = \left[1 - \frac{D + PEA}{R + P} \right] \cdot 100$$

Un IAA alto implica un elevado aprovechamiento de los recursos hídricos (precipitación y riego) mientras que por el contrario IAA bajos indicarían bajas eficiencias de riego y/o escasa regulación hídrica que en definitiva también conduce a un desaprovechamiento del agua dentro del regadío evaluado.

El impacto agroambiental se cuantifica en base a los Índices de Contaminación por Sales (ICS) y por nitrato (ICN). Ambos índices corrigen las masas unitarias de contaminantes exportados (masas exportadas por unidad de superficie) por factores hasta cierto punto de influencia "natural y socioeconó-

mica" como son la geología y las posibilidades agronómicas de un determinado regadío. Así, el ICS se estimó como las sales unitarias exportadas (D_s) dividido por la CE media del drenaje en periodo de no riego (CE_{NR}), parámetro representativo de la salinidad de los materiales geológicos de un determinado regadío. Esta decisión se tomó en base a que la CE_{NR} es un parámetro fácil de conseguir mientras que la salinidad edáfica habitualmente no suele cuantificarse y solo hace referencia a los primeros metros del terreno.

Por otro lado, el ICN se calculó como el nitrato unitario exportado en el drenaje (D_N) dividido por las necesidades de fertilización nitrogenada del sistema (NF). EMR calcula anualmente las necesidades de fertilización a partir las producciones de la "zona" y las extracciones de nitrógeno en las cosechas (Orús y Sin, 2006), salvo para las leguminosas que por su capacidad de fijar simbióticamente el nitrógeno se consideran nulas.

$$ICS = \frac{D_s}{CE_{NR}} ; \quad ICN = \frac{D_N}{NF}$$

Las necesidades de fertilización vienen impuestas por los cultivos implantados y por tanto condicionadas al clima y posibilidades socioeconómicas del regadío, factores no controlados por el agricultor. A mayor necesidad de fertilización existe un mayor riesgo de lixiviado de nitrato que el ICN compensa en la evaluación agroambiental.

El cálculo de estos índices a partir de datos anuales registrados en estudios de diferentes regadíos del Ebro (Tedeschi *et al.*, 2001; Lasanta *et al.*, 2002; Caverro *et al.*, 2003; Causapé *et al.*, 2004a-b; Isidoro *et al.*, 2006a-b) detecta la relación existente entre el IAA y los ICS e ICN (fig. 2) demostrando que el uso apropiado del agua es el factor clave para minimizar la contaminación inducida por el regadío.

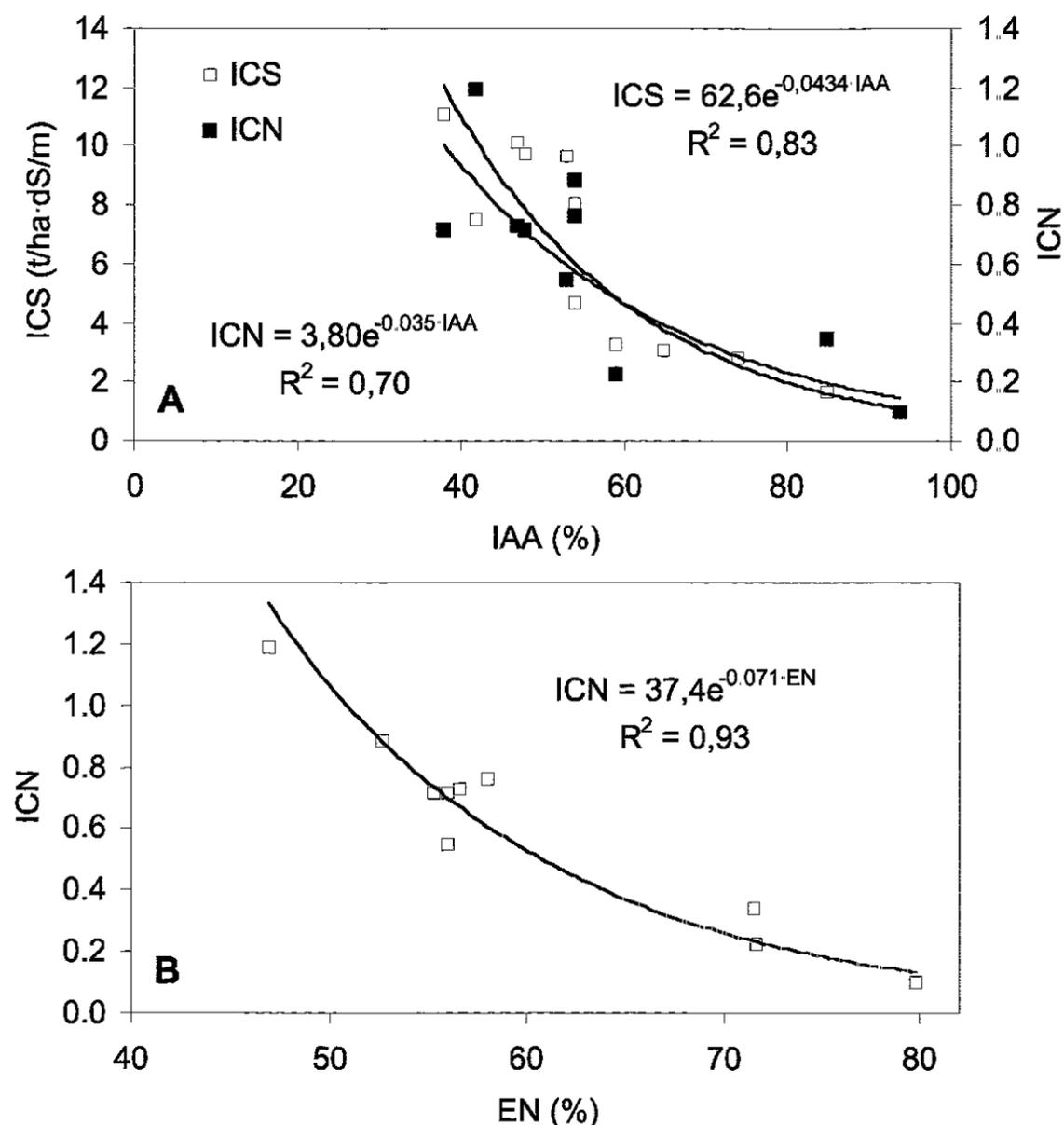


Figura 2. A- Relaciones entre el Índice de Aprovechamiento del Agua (IAA) y los Índices de Contaminación Salina (ICS) y por Nitratos (ICN). B- Relación entre la Eficiencia de aplicación de Nitrógeno (EN) y el Índice de Contaminación por Nitrato (ICN).

Figure 2. A- Relationship between Water Use Index (WUI) and Salt and Nitrate Contamination Indices (SCI and NCI). B - Relationship between nitrogen efficiency (NE) and the Nitrate Contamination Index (NCI).

No obstante, la relación entre el IAA y el ICS ($R^2 = 0,83$) es sensiblemente mejor que la relación entre el IAA e ICN ($R^2 = 0,70$) poniendo de manifiesto que en el caso del nitrato no solo es necesario un uso apropiado del agua si no que también es necesario un manejo adecuado de la fertilización nitrogenada. Prueba de ello es la buena relación existente entre la eficiencia de aplicación del nitrógeno (EN = Necesidades de Fertilización entre el Nitrógeno Aplicado) y el ICN ($R^2 = 0,93$).

En base a las relaciones anteriores (Fig. 2), si se marcara un valor objetivo para los regadíos de $ICS < 2$ t/ha año/dS/m e $ICN < 0,2$ estaríamos asegurando un aprovechamiento del agua y del nitrógeno aplicado en la fertilización superior al 80%.

La tabla 1 presenta una síntesis de los resultados medios anuales de estudios de regadíos de la cuenca del Ebro (Tedeschi *et al.*, 2001; Lasanta *et al.*, 2002; Cavero *et al.*, 2003; Causapé *et al.*, 2004a-b; Isidoro *et al.*, 2006a-b) agrupados en tres grandes áreas regables (Bardenas I, Monegros I, Monegros II). Destaca como modernos y bien gestionados rega-

díos del Ebro ($IAA_{Monegros II} = 90\%$) con abundantes sales en el subsuelo ($CE_{NR} = 8,4$ ds/m), presentan un ICS 67% inferior a regadíos no salinos mal gestionados ($IAA_{Bardenas I} = 52\%$), a pesar de que exportan un 71% más de sales. Así, el ICS permite una mayor masa de sales exportada a los regadíos que por sus condiciones naturales son más salinos.

En el caso de los regadíos estudiados en Bardenas I donde las sales exportadas proceden casi exclusivamente del agua de riego, mejorando sensiblemente el aprovechamiento del agua (IAA del 52 al 90%) se podría prácticamente duplicar la CE_{NR} (de 0,85 a 1,7 dS/m) disminuyendo a la mitad la masa de sales exportada (de 4 a 2 t/ha año) y con ello minimizar el ICS (de 4,8 a 1,2 t/ha año/dS/m) hasta valores del mismo orden al obtenido en los modernos regadíos bien gestionados pero con muchas sales en el subsuelo como Monegros II.

En el ICN, las necesidades de fertilización juegan un papel similar al de la CE_{NR} en el ICS como demuestra el hecho de que los regadíos de Bardenas I presenten un ICN superior

Tabla 1. Índice de Aprovechamiento de Agua (IAA), Conductividad Eléctrica del drenaje en época de no riego (CE_{NR}), Masa anual de sales exportada en el drenaje (D_S), Índice de Contaminación por Sales (ICS), Necesidades de Fertilización (NF), Masa anual de nitrato exportada en el drenaje (D_N) e Índice de Contaminación por Nitratos (ICN) para regadíos estudiados en Bardenas I, Monegros I y Monegros II (Tedeschi *et al.*, 2001; Lasanta *et al.*, 2002; Cavero *et al.*, 2003; Causapé *et al.*, 2004a-b; Isidoro *et al.*, 2006a-b).

Table 1. Water Use Index (WUI), Electric Conductivity of drainage in non-irrigation period (EC_{NI}), annual mass of salts exported in the drainage (D_S), Salt Contamination Index (SCI), Fertilization Needs (FN), annual mass of nitrate exported in the drainage (D_N) and Nitrate Contamination Index (NCI) for irrigation districts studied in Bardenas I (Lasanta *et al.*, 2002; Causapé *et al.*, 2004a-b), Monegros I (Isidoro *et al.*, 2006a-b) and Monegros II (Tedeschi *et al.*, 2001; Cavero *et al.*, 2003).

| | IAA % | CE_{NR} dS/m | D_S t/ha año | ICS t/ha año/dS/m | NF Kg N/ha año | D_N Kg N- NO_3^- /ha año | ICN |
|-------------|----------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|---------------------------------|------|
| Bardenas I | 52 | 0,85 | 4 | 4,8 | 146 | 108 | 0,74 |
| Monegros I | 48 | 1,78 | 20 | 11,4 | 155 | 111 | 0,71 |
| Monegros II | 90 | 8,40 | 14 | 1,6 | 145 | 31 | 0,22 |

(0,74) al de los de Monegros I (0,71) a pesar de exportar una menor masa de nitrato en el drenaje (108 frente a 111 Kg N-NO₃/ha año).

Sin embargo, ante la casi igualdad de necesidades de fertilización en los tres regadíos (tabla 1), el ICN de Monegros II es un 70% inferior al de Bardenas I y Monegros I donde las soluciones a sus problemas agroambientales pasan por un manejo más adecuado del riego y de la fertilización nitrogenada que minimice la masa de nitrato exportada.

El cálculo de estos índices en base a masas de contaminantes exportadas por unidad de superficie permite establecer comparaciones entre regadíos de diferente tamaño. No obstante, la escala de trabajo puede influir en los resultados obtenidos ya que a mayor tamaño se multiplican las posibilidades de reutilización del agua dentro del sistema evaluado con el consiguiente incremento del IAA y disminución de ICS e ICN.

En definitiva, estos índices son más permisivos con aquellos regadíos desfavorecidos, es decir, geológicamente más salinos y en los que se desarrollen cultivos con mayores necesidades de fertilización y por tanto con mayores riesgos "naturales" para el lavado de sales y nitrato. No obstante, para todos los regadíos exigen una buena gestión que se puede conseguir a través del adecuado manejo agronómico a nivel de parcela y/o a través de la adecuada gestión a nivel de distrito de riego.

Conclusiones

EMR constituye una herramienta de fácil manejo para la evaluación agroambiental de regadíos avalada por los resultados obtenidos en proyectos de investigación basados en la misma metodología. La unificación metodológica incorporada en EMR para la evaluación agroambiental de regadíos permitirá comparar la calidad del riego e impac-

to agroambiental de una amplia variedad de regadíos. La posibilidad de uso a distintas escalas y con una disponibilidad de datos mínima, facilitará su uso sistemático por técnicos encargados de la gestión del agua.

Los indicadores agroambientales propuestos para la contaminación por sales (ICS) y nitrato (ICN) están relacionados con el aprovechamiento del agua y del nitrógeno aportado en la fertilización, factores clave para minimizar el impacto ambiental del regadío. De tal forma, que si un regadío presenta índices de contaminación por sales y nitrato inferiores a 2 t/ha-año/dS/m y 0,2 respectivamente, sería indicativo de que el regadío aprovecha más del 80% de los recursos hídricos (riego y precipitación) y del nitrógeno aportado en la fertilización.

El hecho de que ICS e ICN estén basados en la masa unitaria de contaminantes exportada corregida por factores representativos de sus condiciones "naturales y socioeconómicas" provoca que estos índices sean más permisivos con los regadíos más desfavorecidos, lo que no impide, que exijan por igual la adecuada gestión de todos los regadíos.

En definitiva, el Evaluador Medioambiental de Regadíos (EMR) distribuido gratuitamente (<http://acebo.pntic.mec.es/jcav0026/investigacion/EMR.htm>), se presenta como una herramienta sencilla y eficaz al servicio de la vigilancia agroambiental de regadíos. Los índices que calcula podrían ser incorporados a la legislación vigente imponiendo la consecución de valores objetivo que conduzcan hacia sistemas agrarios más eficientes y respetuosos con el medio ambiente.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación de Confederación Hidrográfica del Ebro y del Ministerio de Educación y

Ciencia dentro del marco del proyecto AGL2005-07161-C05-01/AGR, titulado: Red de cuencas experimentales agrarias para la investigación de la contaminación difusa del regadío. Red CCoR. Un especial agradecimiento a Sergio Pérez, responsable informático de EMR, y a Ignacio Clavería, ingeniero agrícola "probador" de la aplicación informática.

Referencias

- Allen R, Pereira L, Raes D, Smith M, 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper nº 56. FAO. Roma (Italia). 300 pp.
- Causapé J, Quílez D, Aragüés R, 2004a. Assessment of irrigation and environmental quality at the hydrological basin level. I: Irrigation quality. *Agricultural Water Management*. 70: 195-209.
- Causapé J, Quílez D, Aragüés R, 2004b. Assessment of irrigation and environmental quality at the hydrological basin level. II: salt and nitrate loads in irrigation return flows. *Agricultural Water Management*. 70: 211-218.
- Causapé J, Quílez D, Aragüés R, 2006. Irrigation efficiency and quality of irrigation return flows in the Ebro River Basin: An overview. *Environmental Monitoring and Assessment*. 117: 451-461.
- Causapé J, Pérez S, 2007. Evaluador Medioambiental de Regadíos. EMR 1.0. Manual de Usuarios. Depósito Legal: Z-2312-2007. ISBN: 978-84-690-6960-8. 26 pp. Disponible en: <http://acebo.pntic.mec.es/jcav0026/investigacion/EMR.htm>
- Cavero J, Beltrán A, Aragüés R, 2003. Nitrate exported in the drainage water of two sprinkler irrigated watershed. *J. Environmental Quality* 32: 916-926.
- European Union, 1991. Council Directive 91/676/EEC of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources. *Official Journal L* 375, 31/12/1991: 1-8.
- European Union, 1998. Council Directive 98/83/CE of 3 November 1998 imposed to the surface waters devoted to the production of water for human consumption. *Official Journal L* 330, 5/12/1998. 32-54.
- European Union, 2000. Directive 2000/60 of the European Parliament and of the Council establishing a framework for community action in the field of water pollution. *Official Journal L* 327, 22/12/2000. 1-72.
- European Union, 2006. Directive 2006/118/EC of the European Parliament and of the Council of 12 December 2006 on the protection of groundwater against pollution and deterioration. *Official Journal L* 372/19, 27/12/2006. 19-31.
- Isaaks E, Srivastava RM, 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford University, Nueva York, 561 pp.
- Isidoro D, Quílez D, Aragüés R, 2006a. Environmental Impact of Irrigation in La Violada District (Spain): I. Salt Export Patterns. *Journal Environmental Quality* 35: 766-775.
- Isidoro D, Quílez D, Aragüés R, 2006b. Environmental Impact of Irrigation in La Violada District (Spain): II. Nitrogen Fertilization and Nitrate Export Patterns in Drainage Water. *Journal Environmental Quality* 35: 776-785.
- Lasanta T, Mosch W, Pérez-Rontomé MC, Navas A, Machín J, Maestro M, 2002. Effects of irrigation on water salinization in semi-arid environments. a case study in Las Bardenas, Central Ebro Depression, Spain. *Environmental change and water sustainability*. García-Ruiz JM, Jones A, Arnáez J, Eds. Instituto Pirenaico de Ecología. 198-218.
- Orús F, Sin E, 2006. El balance del nitrógeno en la agricultura. Capítulo 1 en Fertilización Nitrogenada. Guía de actualización. *Informaciones Técnicas*. Centro de Transferencia Agroalimentaria. Ed Gobierno de Aragón. 196 pp.
- Salvador R, 2003. Estudio de las pérdidas por evaporación y arrastre en los sistemas de riego por aspersión: Diferencias entre riegos diurnos

nos y nocturnos. Proyecto fin de carrera de Ingeniería Agrónoma. Universidad de Lérida, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria. Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. 206 pp.

Tedeschi A, Beltrán A, Aragüés R, 2001. Irrigation management and Hydrosalinity balance in a semi-arid area of the middle Ebro River Basin (Spain). *Agricultural Water Management*. 49: 31-50.

(Aceptado para publicación el 18 de abril de 2008)