

MINIMIZACIÓN DE IMPACTOS EN LA AGRICULTURA DE REGADÍO

DANIEL ISIDORO. *Unidad de Suelos y Riegos (Unidad Asociada EEAD-CSIC). Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón*
Avda. Montañana 930, 50059 Zaragoza.
disidoro@aragon.es

INTRODUCCIÓN

En climas semiáridos, como el del centro de la Cuenca del Ebro, el regadío es clave para asegurar los rendimientos y garantizar un nivel de vida adecuado a la población rural y contribuye sustancialmente al mantenimiento de la población en áreas rurales. El regadío además confiere una estabilidad a la producción agrícola (reduciendo las diferencias entre años buenos y malos) de gran importancia para los productores y desde el punto de vista de la garantía del abastecimiento. El regadío es una práctica milenaria en la cuenca del Ebro, pero ha experimentado un desarrollo más que notable en el último siglo como resultado de la convicción de que el desarrollo económico de estas tierras debía venir de la mano del regadío.

Pero el regadío tiene también unos impactos sobre el medio natural en muchos casos desfavorables. La preocupación sobre estos aspectos medioambientales del riego es mucho más reciente que la preocupación por asegurar unos rendimientos adecuados y estables y surge de la mayor preocupación social por el medio ambiente [que se traduce en normas como la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE) que exigen el *buen estado* de las aguas] y de la competencia cada vez mayor por los recursos hídricos entre los distintos usos (urbanos, industriales, energéticos, medioambientales, lúdicos y agrícolas), sin duda consecuencia directa del desarrollo económico.

Los efectos ambientales del regadío sobre los recursos hídricos son consecuencia de la detracción del agua de los acuíferos o cauces naturales (donde disminuye su disponibilidad) y del uso que se hace de ella, que disminuye la cantidad total de agua [una parte sustancial ha de contribuir a la evapotranspiración (ET) de los cultivos] y da lugar a unos retornos

de peor calidad que el recurso original (por el arrastre de sales del suelo-subsuelo y de los agroquímicos que se aportan para incrementar la producción). Además, en ausencia de un drenaje que garantice un lavado suficiente o con un manejo inadecuado, el riego puede dar lugar a la degradación de los suelos regados (lo que en numerosas zonas del mundo ha llevado al abandono de grandes superficies regables) o a la acumulación de sales en zonas de descarga de los flujos subterráneos.

Este artículo pretende dar una visión global de los problemas ambientales del regadío, en especial en la Cuenca del Ebro, y presentar algunas de las estrategias adoptadas para reducirlos en diversas zonas del mundo.

IMPACTO AMBIENTAL DEL REGADÍO

Los impactos ambientales más severos debidos al regadío se corresponden con (a) los efectos internos de degradación del sistema regado (los suelos principalmente); y (b) los efectos sobre las aguas a través de los retornos de riego (efectos externos). A estos habría que añadir los impactos propios de las obras de construcción del regadío (redes de caminos y acequias, tendidos eléctricos y muy especialmente construcción de presas) que no trataremos en este artículo y (c) la emisión de gases de efecto invernadero, ligada a la actividad agrícola como en general a cualquier otra que demande el consumo de combustibles fósiles.

a) Efectos internos del regadío

Acumulación de agua (aparición de una capa freática somera)

La puesta en riego implica introducir en el territorio regado una cantidad de agua muy superior a las entradas naturales. Cuando los suelos regados no



Figura 1. Efecto de la salinidad sobre el crecimiento de una plantación de olivos en Callén (Huesca) en 2001: los olivos de la parte más alejada de la primera hilera se encontraban sobre un suelo más salino y presentaron problemas de crecimiento y de supervivencia al cabo de 3 años. La distribución de la salinidad en esta parcela estaba ligada a una capa freática alta y a una elevación relativa del terreno baja. En las áreas en las que la profundidad de la capa freática era inferior a 120 cm la mortalidad de los árboles fue prácticamente del 100%.

pueden evacuar ese exceso de agua, se llega a producir la aparición de una capa freática somera antes inexistente o la elevación del nivel freático preexistente. Una capa freática demasiado alta afecta al crecimiento de los cultivos pudiendo llegar a producir su muerte (Fig. 1); pero el principal problema de una capa freática muy superficial es que contribuya, por ascenso capilar, a la evaporación desde la superficie del suelo. En ese caso, el agua que se evapora deja en el suelo sus sales disueltas produciendo con el tiempo la salinización del suelo regado.

Salinización y sodificación del suelo

La salinización consiste en la acumulación de sales solubles en el perfil del suelo. Éstas se acumulan en el mismo suelo regado cuando un drenaje insuficiente permite la formación de una capa freática somera como ya hemos visto; pero también puede producirse la acumulación de sales en zonas que reciben el drenaje de las zonas regadas. Un exceso de salinidad en el cultivo limita el crecimiento de las plantas cultivadas (y reduce su rendimiento) pudiendo provocar la muerte de los cultivos (Fig. 1).

Para combatir la acumulación de agua y la salinización in-situ asociada se requiere drenar el exceso de agua. Para ello hay que asegurar el drenaje de los suelos, mediante la instalación de una red de drenaje artificial si el drenaje natural no es suficiente. Cuando la pendiente natural del terreno es tan limitada que el drenaje por gravedad resulta lento o problemático se puede recurrir al «drenaje vertical»: la instalación de pozos que bombean el agua del freá-

tico somero y la conducen fuera de la zona regable. Los suelos salinizados pueden recuperarse mediante el lavado. El lavado de los suelos consiste en aplicar grandes volúmenes de agua (mediante riego) para lavar las sales del perfil; pero para que se produzca el lavado es necesario asegurar el drenaje del suelo, instalando para ello si es necesario una red de drenaje.

Es muy importante recordar que todo regadío debe poder evacuar el exceso de agua y de sales. Aún en ausencia absoluta de sales en el suelo, las sales aportadas con el agua de riego podrían llevar a la salinización del suelo por muy baja que sea la salinidad del agua de riego. Por ello es imprescindible para la sostenibilidad del regadío la presencia de una red de drenaje adecuada.

Un aspecto diferente, pero relacionado, es la movilización de sales de estratos salinos por el riego y la acumulación de esas sales en las zonas de descarga de los flujos subterráneos (dentro del área regada o en zonas distantes). En los regadíos de Bardenas, por ejemplo, las tierras de las vales eran tenidas por más productivas en condiciones de secano (suelos profundos, de textura más fina y con mayor capacidad de retención de humedad), mientras que los sasos, con suelos más pedregosos y menos profundos, eran considerados peores tierras. Tras la puesta en riego los colonos descubrieron que los sasos, bien drenados, daban unos excelentes rendimientos; mientras que aparecían problemas de exceso de agua y de salinidad en las vales, donde al riego se unían los flujos de agua procedentes del drenaje de los sasos (a veces también salinos al circular el drenaje sobre la capa impermeable de margas salinas, el «buro»). La modificación del ciclo hidrológico cambia el valor relativo de las tierras. Una estrategia para captar esos flujos salinos es la utilización del «biodrenaje», es decir, la captación de esos flujos por árboles evitando que lleguen a las zonas de descarga. El *biodrenaje* es más eficiente si se lleva a cabo en las zonas de recarga.

Además, en los regadíos tradicionales por superficie, la sistematización de las tierras en pendientes fuertes puede dejar en superficie estratos salinos antes situados en profundidad limitando el crecimiento de los cultivos sobre esos afloramientos (Fig. 2).

La sodificación consiste en la acumulación relativa de sodio en los suelos (el enriquecimiento de los mismos en sodio en relación a su contenido de calcio y magnesio). La sodificación se produce tanto con aguas de riego de muy buena calidad (baja salinidad) aunque no tengan una proporción alta de sodio, como en condiciones de salinidad elevada (porque las sales de calcio y magnesio tienden a precipitar, aumentando así la proporción relativa de

sodio en la solución del suelo). El problema de los suelos sódicos es la pérdida de estabilidad estructural de las arcillas, las partículas más finas de suelo, que se dispersan y taponan los poros del suelo con lo que éste se vuelve impermeable. La sodificación es más difícil de combatir que la salinización, porque la impermeabilización de los suelos previene el lavado de las sales de sodio. Para recuperar los suelos sódicos es necesario aplicar enmiendas que liberen calcio (el yeso o el ácido sulfúrico en terrenos calizos son las más frecuentes) para que pueda sustituir al sodio.

La salinización y sodificación han llevado a la pérdida de la capacidad productiva de los suelos y el abandono de numerosas zonas regables en todo el mundo. De modo generalizado, los problemas de salinización van asociados a un mal manejo del riego (dosis excesivas, drenaje inexistente o no operativo y canales sin revestir) que dan lugar a la acumulación de agua, que lleva a la salinización del suelo, que a su vez causa la salinización de las aguas, a través de un drenaje reducido pero cada vez más salino. Es el caso de los riegos de la cuenca del Mar de Aral (principalmente en Uzbekistán), donde el desarrollo del riego desde 1960 (unos 8 millones de ha) ha reducido los aportes al mar en un 92% (de 56 km³/año a 4 km³/año), dando lugar a una reducción del volumen de agua almacenada (de 1.000 km³ a 75 km³, que ha llevado incluso a la separación del mar de Aral en dos pequeños lagos) y una elevación sin precedentes de la salinidad (de 3 g/L a 20 g/L en el lago Norte y 70 g/L en el lago Sur). La pesca prácticamente ha desaparecido como recurso y la acumulación de desechos tóxicos en el fondo del antiguo mar y su movilización por el viento está dando lugar a graves problemas de salud, todo lo cual se ha traducido en una disminución de la esperanza de vida de 65 a 61 años. El riego a manta, excesivo, y los canales sin revestir han dado lugar a una capa freática muy elevada que contribuye entre un 30% y un 60% de la ET total, con la consiguiente salinización del suelo (las pérdidas de rendimiento se estiman entre el 5 y el 30% globalmente). Como respuesta a la pérdida de productividad los agricultores intentan poner en riego más superficie, con lo que las posibilidades de culminar sus cosechas se reducen (en un 16%) por falta de agua. La situación se agrava porque el cultivo más rentable en la zona es el algodón, con una demanda de agua muy elevada, contribuyendo a la disminución de los recursos y a su salinización. Pese a la gravedad de la situación, ésta se debe en gran medida a un manejo inadecuado y puede reconducirse (aunque la práctica del riego a gran escala sea incompatible con el mantenimiento de la situación original). Lejos de esa situación, la salinización/sodificación de los suelos regados también es un proble-

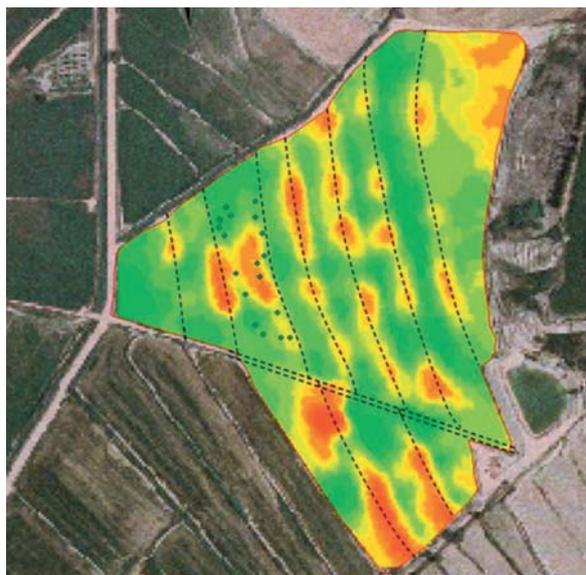


Figura 2. La nivelación, especialmente sin capaceo, en pendientes fuertes hace aflorar a la superficie los estratos profundos de margas salinas ("buro") dando lugar a fajas de salinidad elevada en el suelo en la parte de los tablares más próxima a los taludes y en las zonas de mayores desmontes (en rojo en la figura), mientras que las zonas que han recibido mayores aportes de suelo superficial presentan menor salinidad (en verde en la figura). La foto corresponde a una parcela cultivada de arroz en la zona de El Bayo (Zaragoza).

ma latente en la Cuenca del Ebro, donde en 1988 se estimaba que el 28% de la superficie de los grandes sistemas regables estaba afectado por salinidad o sodicidad.

Finalmente, en zonas costeras el riego con aguas subterráneas puede dar lugar a la *intrusión marina*: al disminuir la recarga neta a los acuíferos costeros respecto a la situación original (por aumento de la ET) la interfaz entre el agua salada y el agua dulce en el acuífero se desplaza hacia el interior y hacia la superficie; con lo que el agua bombeada para riego es cada vez más salina repercutiendo en los rendimientos de los cultivos y en sus posibilidades de utilización. La intrusión marina es ya un problema grave en la mayor parte de los acuíferos mediterráneos españoles.

b) Efectos externos del regadío (sobre la cantidad y calidad del agua)

b.1) Alteración del régimen hidrológico

La consecuencia más directa de la transformación en regadío es la disminución de los recursos hídricos disponibles a escala de cuenca hidrológica: el riego implica dotar de agua a ciertos cultivos para que la transpiren y toda el agua que se transpire dejará de estar disponible en la cuenca para otros usos. Por otro lado, el riego implica normalmente extraer agua en los periodos de mayores caudales y

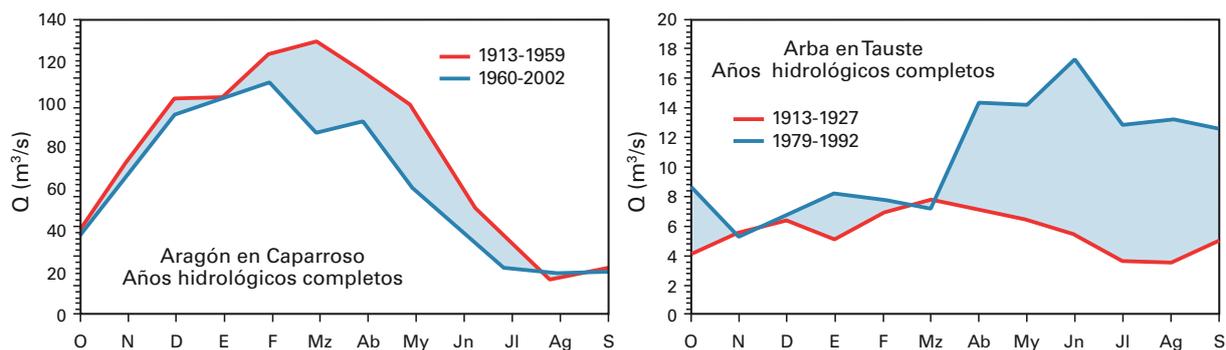


Figura 3. La detección para riego en el río Aragón a través de la presa de Yesa y el Canal de Las Bardenas ha supuesto un descenso del caudal en el tramo inferior del río Aragón (Aragón en Caparroso, izquierda) especialmente acusado en primavera (333 hm³/año entre marzo y junio) los meses máximo almacenamiento en el pantano de Yesa; pero a su vez ha dado lugar a un incremento notable (140 hm³/año) de los recursos disponibles en el río Arba durante los meses de verano (Arba en Tauste, derecha).

almacenarla para su consumo en los períodos de mayor demanda, lo que da lugar a que el volumen de agua disponible durante la estación de riego, normalmente seca, sea mayor que en la situación original (Fig. 3). Cuando los recursos de riego proceden de una cuenca distinta, los retornos de riego pueden dar lugar a una disponibilidad de agua mayor que en el régimen natural original, como ocurre, por ejemplo, con los riegos de Bardenas en la cuenca del Arba (Fig. 3).

Es importante señalar que la modernización de regadíos (actualmente en proceso en muchos regadíos de la Cuenca del Ebro), en cuanto que supondrá una mayor producción (tal y como se está produciendo actualmente, con un cambio en el patrón de cultivos hacia cultivos extensivos de verano y no hacia hortícolas o frutales), traerá consigo un incremento en el uso consuntivo del agua (mayor ET) y por tanto una disminución de los recursos globales; pero también una mejora de la calidad global del agua en cuanto a la salinidad y en cuanto a los contaminantes químicos siempre que estos se manejen adecuadamente (Fig. 9).

b.2) Degradación de la calidad del agua

El drenaje procedente de las zonas de riego (los retornos de riego) va a parar a otras masas de agua, aportando todos los contaminantes que lleva consigo. Los principales constituyentes en el agua de retornos de riego que afectan a la calidad de las aguas son la salinidad, los nutrientes, los sólidos en suspensión y los plaguicidas. Las aguas de retorno de riego no son un cuerpo homogéneo, sino que resultan de la mezcla de varias componentes, cada una de las cuales tiene unas características de calidad diferentes: el drenaje de los suelos regados (cargado en contaminantes solubles: sales, nitrato y algunos plaguicidas; y libre de sólidos en suspensión); las escorrentías superficiales de las parcelas

(cargadas en sólidos en suspensión y productos adsorbidos: fósforo y plaguicidas); y las aguas de colas de canales de riego, en general de la misma calidad que el agua de riego y que tiende a diluir los retornos de riego.

La salinidad de los retornos de riego

La salinidad del drenaje de riego obedece al «efecto evapoconcentración» (al producirse la evapotranspiración de una parte sustancial del agua de riego, la concentración del drenaje ha de ser mayor que la del riego para mantener el balance entre las sales aportadas por el riego y las extraídas por el drenaje) y el «efecto aporte» (meteorización de los minerales o disolución de yeso o sales solubles por las aguas de drenaje en el suelo y sub-suelo). Generalmente, y más en medios áridos y semiáridos donde son frecuentes los depósitos salinos, el efecto aporte es más importante que el efecto evapoconcentración.

En todo el mundo abundan los ejemplos de los problemas de salinidad debidos a la movilización de sales por el riego. En Australia, la puesta en riego de extensas zonas en la cuenca del río Murray-Darling ha dado lugar a la recarga de acuíferos profundos muy salinos, antes desconectados del río Murray. Al subir el nivel de estos acuíferos, comenzaron a drenar hacia los ríos aumentando considerablemente su salinidad. La solución por la que han optado en Australia, ha sido el bombeo del agua de estos acuíferos hacia humedales artificiales (Fig. 4) evitando que se incorporen a los ríos y manteniendo así la salinidad de los mismos relativamente baja y con ello sus opciones de uso. Sin embargo, el principal pilar (y el más innovador) en la lucha contra la salinización en la cuenca del Murray-Darling ha sido la creación de un sistema de créditos y débitos de salinidad dentro de una iniciativa de manejo a escala de cuenca hidrológica (hay que decir que España es pionera en la ges-



Figura 4. Sistema de intercepción de sales (SIS) en la cuenca del Murray-Darling (Australia): la estación de bombeo (izquierda) es una de las que forman el SIS de Waikerie y que interceptan el flujo del acuífero muy salino (~ 20 g/l) movilizado por el riego, especialmente de plantaciones de cítricos, y que descarga hacia el río Murray, apenas 100 m detrás de la estación, y la conducen hasta la laguna artificial de Stockyard (derecha) que se ha convertido en una reserva de vida silvestre.

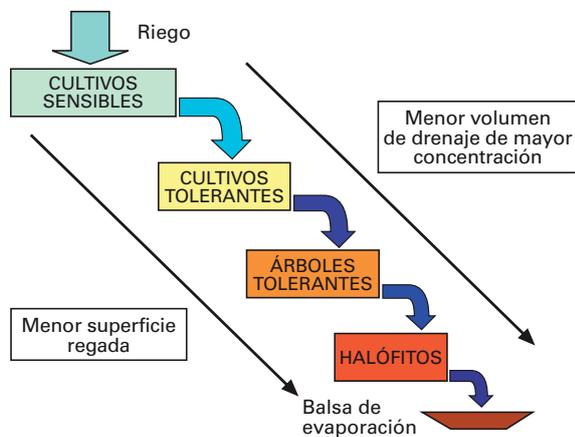


Figura 5. Esquema de la reutilización secuencial del drenaje (izquierda) y balsa de evaporación (derecha) en el Valle de San Joaquín de California (EE.UU.). El drenaje (muy reducido y muy concentrado por la sucesiva reutilización del agua de drenaje de cultivos progresivamente más tolerantes a la salinidad) de la explotación es conducido a la balsa donde se evapora y deja las sales arrastradas.

ción del agua a escala de cuenca). Por este sistema, se contabilizan como créditos los proyectos que tienden a disminuir la salinidad en las aguas de la cuenca (construcción de sistemas de intercepción de sales, por ejemplo) y como débitos los que la incrementan (creación de nuevas zonas regables o construcción de drenes, por ejemplo); y se les asigna un valor de sales retiradas o aportadas. Los estados ribereños han de compensarse por los créditos-débitos alegados para mantener la salinidad en distintos tramos del río y los aportes totales de las sub-cuencas por debajo de unos límites prefijados.

En algunos casos, la movilización de sales de estratos salinos lleva consigo el arrastre de elementos tóxicos. Es el caso del riego del sector occidental del Valle del San Joaquín, en California (EE.UU.), donde las aguas de drenaje cargadas de selenio del dren de San Luis afectaron gravemente a la fauna

del humedal receptor (el refugio de vida salvaje de Kesterson). En California se llegó a prohibir la emisión de agua de drenaje desde las zonas regadas lo que ha dado lugar a los sistemas de reaprovechamiento secuencial del agua de drenaje: los cultivos de mayor valor económico, sensibles a la salinidad, se riegan con el agua más adecuada, menos salina; cuyo drenaje se utiliza para regar cultivos más tolerantes a salinidad (forrajes normalmente); el drenaje de estos riegos se emplea en cultivos leñosos más tolerantes (eucaliptos normalmente) y el drenaje de estas tierras se emplea en el riego de plantas muy tolerantes a la salinidad (halófitas). Finalmente el drenaje muy salino de estas tierras se lleva (mediante aspersores para favorecer la evaporación del agua) a balsas de evaporación, impermeabilizadas, donde se acumulan y de donde se retiran periódicamente (Fig. 5).

Los nutrientes en las aguas de drenaje

Los nutrientes principales son el nitrógeno (N) y el fósforo (P), ambos esenciales para el desarrollo de los cultivos y aportados en grandes cantidades en la agricultura de los países desarrollados mediante la fertilización mineral y orgánica. El nitrógeno suele presentarse en forma de nitrato (NO_3^-) disuelto en el agua, aunque también se presenta en menor medida como amonio disuelto (NH_4^+) y como nitrógeno orgánico asociado a las partículas en suspensión. El fósforo, en cambio, se presenta sobre todo adsorbido a los sólidos en suspensión (partículas orgánicas y de suelo suspendidas en el agua) aunque una parte se presenta como fosfato disuelto (PO_4^{3-}). Dado que el N se encuentra principalmente disuelto, suele presentar mayores problemas en aguas subterráneas (contaminación de acuíferos) aunque también llega a producir problemas en aguas superficiales; mientras que el P también puede ser un problema en ambos tipos de aguas, pero lo es con mayor frecuencia en las aguas superficiales.

El exceso de N y P da lugar a la eutrofización de los lagos y embalses, e incluso de las aguas costeras en torno a los deltas y estuarios de ríos. La eutrofización es un grave problema ambiental que da lugar a la muerte de las algas y los peces y al consumo del oxígeno disuelto en el agua. En numerosas zonas

agrícolas del mundo está comprobado que el nitrógeno del agua procede en gran medida del lavado del fertilizante nitrogenado aplicado a los cultivos, y en el caso de zonas áridas, donde la agricultura de regadío recibe la mayor parte de la fertilización, del regadío, como muestra la Figura 6 para la Cuenca del Ebro.

Frecuentemente los aportes de nutrientes en el agua de drenaje (es decir, la masa de P y N exportada desde las zonas regables) sigue claramente a las aportaciones de fertilizantes siempre que haya unos flujos de agua que arrastren esos aportes de fertilizantes: las lluvias de invierno o, especialmente, el riego (Fig. 7). En ese sentido, aplicar el riego de tal manera que minimice las salidas de drenaje es una de las claves para reducir las exportaciones de N y P. Los riegos por aspersión y por goteo, más eficientes que el riego tradicional por inundación, originan un volumen de drenaje menor (aunque más concentrado) y arrastran una cantidad de N menor como muestra la Tabla 1. La otra estrategia para reducir las emisiones de nutrientes es adaptar las fechas de fertilización a las necesidades de los cultivos y acoplar adecuadamente las fechas de riego y fertilización (no aplicar riegos ineficientes inmediatamente después de la fertilización de fondo, por ejemplo); objetivos mucho más asequibles también con sistemas de riego por aspersión o goteo.

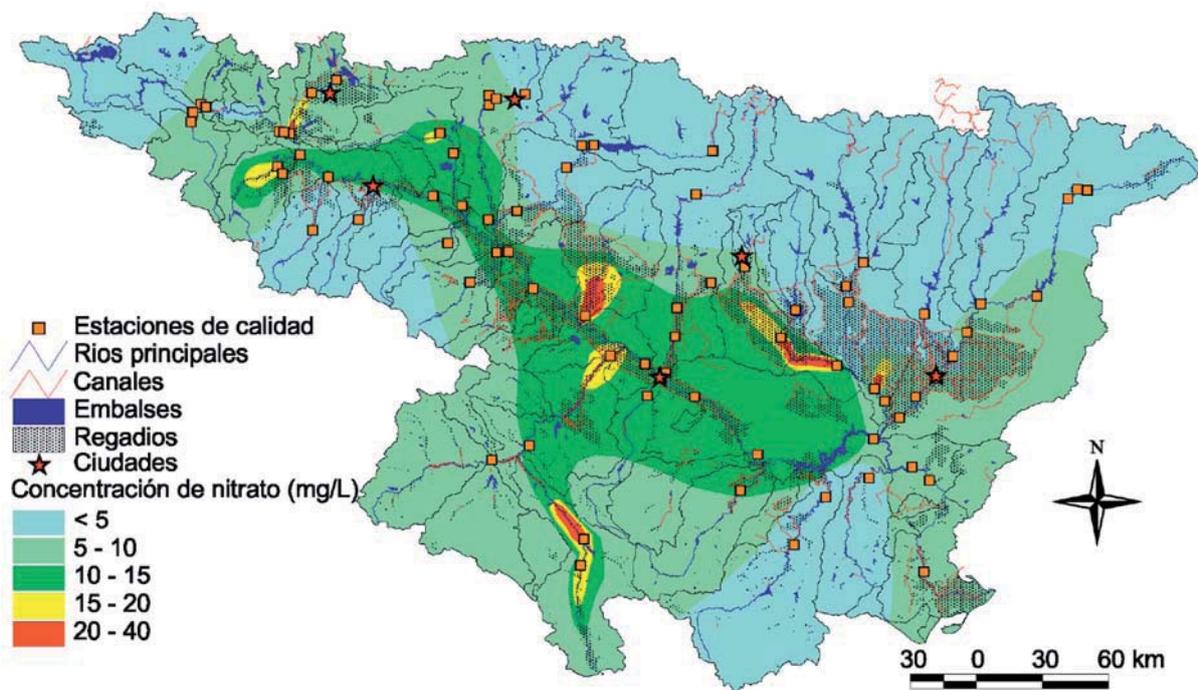
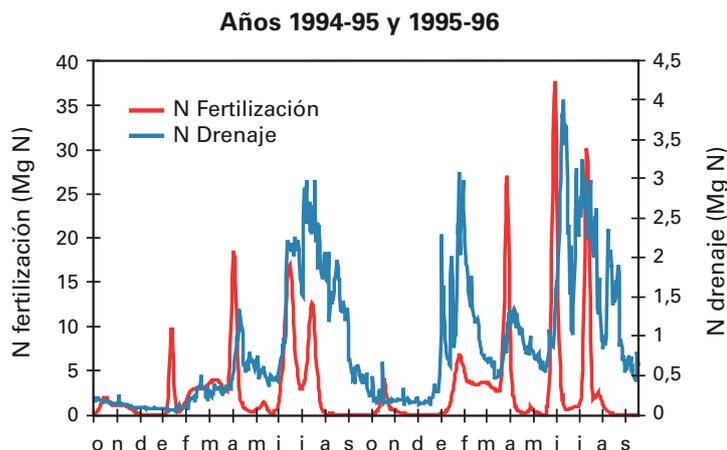


Figura 6. Zonas regables y concentración de NO_3 en las aguas superficiales de la Cuenca del Ebro (1987-90). Algunas de las zonas con mayores concentraciones de NO_3 (ríos Arba, Flumen-Alcanadre, Clamor Amarga, Alto Jiloca, Bajo Jalón y Tirón) se corresponden con cuencas con un desarrollo importante del regadío.

Figura 7. La masa de nitrógeno exportada por el drenaje (N Drenaje) refleja la cantidad de nitrógeno aplicada con la fertilización (N Fertilización) y movilizada por el riego y la precipitación en la zona regable de Almodévar (Huesca). En conjunto, un 30% del nitrógeno aplicado con la fertilización mineral y orgánica en los años 1995 y 1996 en Almodévar se perdió con las aguas de drenaje.



	Drenaje (mm)	NO ₃ (mg/L)	MN (t N/año)	% Fert
La Violada	618	40.3	83.2	30%
D-IX	76	122.8	14.2	8%
D-XI	194	102.3	24.8	22%

Tabla 1. Volumen de drenaje, concentración de nitrato (NO₃) en el agua de drenaje, masas de nitrógeno exportadas (MN, toneladas) y porcentaje que supone la masa exportada sobre las entradas por fertilización (% Fert) en tres zonas de regadío de la Cuenca del Ebro entre 1995 y 1998. La cuenca de La Violada, regada por superficie, presentó una concentración menor de NO₃ en el agua de drenaje, pero una masa de nitrógeno exportada mucho mayor que las cuencas de los colectores D-IX y D-XI en Monegros II (riego por aspersión), puesto que el drenaje (y también el riego) fue mucho mayor. El porcentaje de N exportado por el drenaje sobre el aplicado por fertilización también fue mayor en el caso de La Violada, lo que se traduce en una mayor pérdida económica. Las diferencias entre D-IX y D-XI se deben sobre todo al patrón de cultivos.

La reducción de las dosis de fertilizantes (nitrogenados) que se aplican a los cultivos es otra estrategia para reducir la contaminación inducida por la agricultura y en particular por el regadío. En España, la Directiva de nitratos (91/676/CE) recoge en los códigos de buenas prácticas agrarias y en los planes de actuación de las *Zonas Vulnerables* (zonas de recarga de masas de agua superficiales o subterráneas que contienen más de 50 mg/l de nitrato o pueden llegar a contenerlo si no se protegen) medidas para la reducción de la contaminación por nitrato, que hacen incidencia específicamente en el uso de las deyecciones ganaderas, los periodos en que no es conveniente la aplicación de fertilizantes, las limitaciones en la aplicación de fertilizantes a las tierras que sea compatible con las prácticas agrarias correctas, dosis máximas y momentos de aplicación, y al manejo del riego.

Sólidos en suspensión

Los sólidos en suspensión en las aguas de drenaje indican en primer lugar un problema de arrastre de suelo de las zonas regadas, es decir, de erosión. Los sedimentos en sí dan lugar al aterramiento de los

lagos y embalses, pueden impedir el paso de la luz y degradar las zonas de desove de los peces, y alteran el comportamiento hidráulico de los cauces, lo que puede dar lugar a problemas en caso de avenidas. Otro aspecto relevante de los sedimentos es que pueden llevar asociados ciertos contaminantes (fósforo y algunos plaguicidas, sobre todo), convirtiéndose a largo plazo en una fuente de los mismos al agua de los ríos.

Contaminación por plaguicidas

Los plaguicidas difieren de los demás contaminantes del regadío por su alta toxicidad para el medio biológico y para el hombre y por la complejidad de su comportamiento en el medio. Los principales efectos tóxicos de los pesticidas sobre los seres vivos son la muerte, aparición de tumores, problemas reproductivos, inmunológicos y hormonales y malformaciones.

La complejidad viene determinada por los fenómenos de *degradación* y de *partición*. La degradación consiste en que los plaguicidas se descomponen en otras sustancias, sus metabolitos, a veces tan tóxicos o más que los mismos plaguicidas apli-

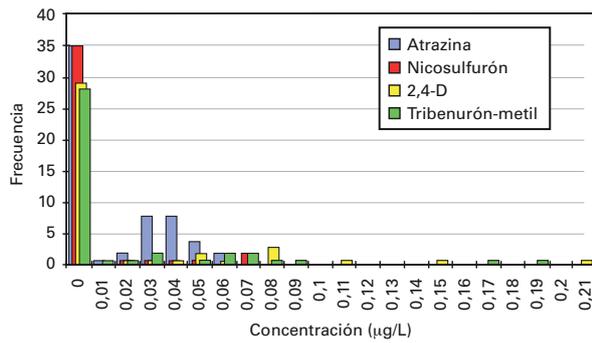


Figura 8. Numero de veces (Frecuencia) que se ha encontrado un plaguicida a una concentración determinada (eje X) en el Bco de La Violada (Almudévar, Huesca) entre 2006 y 2009. A pesar de no utilizarse apenas en esos años, el plaguicida con un mayor número de detecciones fue la Atrazina, un plaguicida muy empleado en años anteriores en el cultivo de maíz, lo que refleja su persistencia en el medio. Las concentraciones máximas, aunque con un menor número de detecciones, corresponden al Tribenurón-metil y al 2,4-D empleados en el cultivo de cebada, dominante en Almudévar en 2006-2009. El Nicosulfurón, detectado menos veces y con concentraciones en general menores que el Tribenurón-metil y 2,4-D se empleó en el cultivo de maíz.

cados y que también es necesario analizar para establecer el grado de contaminación de las aguas o del suelo. Es el caso, por ejemplo, del DDT que se transforma en otras formas tóxicas, el DDD y el DDE; o de la Atrazina, tan utilizada hasta hace poco en el cultivo de maíz, que se transforma en Desetil-atrazina.

La partición consiste en el fraccionamiento del plaguicida aplicado en diversas partes del medio: adsorción a las partículas del suelo, absorción por los microorganismos, volatilización, disolución en el agua, etc. Esta distribución del plaguicida por todas las fases del medio hace que para establecer la cantidad de plaguicida en el mismo no sea suficiente con muestrear, por ejemplo, el agua de los ríos, sino que también sea necesario muestrear el resto del medio: los suelos, sedimentos en los fondos de los ríos y, especialmente, los seres vivos o *biota* (muestreo multi-media). La necesidad de muestrear la *biota* se deriva también de la tendencia de algunos plaguicidas a acumularse en los tejidos grasos de los seres vivos, lo que se denomina *bio-concentración* (como el DDT por ejemplo; otros, en cambio, se suelen excretar fácilmente, como el Glifosato) y por su tendencia a acumularse en mayor concentración en los niveles superiores en la cadena trófica (*bio-acumulación*). Todos estos procesos hacen que los plaguicidas puedan permanecer en el medio largo tiempo y que se sigan encontrando concentraciones apreciables mucho después de su utilización (persistencia). La Figura 8 presenta a modo de ejemplo las concentraciones encontradas en el Bco de La Violada de los plaguicidas más utilizados en la zona.

Masa o concentración

El efecto que las aguas de retorno de riego tienen sobre la masa de agua que los recibe viene determinado por la masa de contaminante en las aguas de retorno, no por su concentración. Ciertamente las posibilidades de utilización directa de las aguas de drenaje están determinadas por la concentración de los contaminantes en el drenaje, pero la concentración de los contaminantes en el cuerpo de agua receptor aumenta con la masa de contaminante que

le aporta el drenaje, independientemente de su concentración, como se muestra para un caso sencillo de lavado de sales en la Figura 9.

Puesto que es la masa de los retornos la que da lugar a la contaminación de las aguas receptoras, la estrategia general para reducir la contaminación debida al riego es reducir los retornos de riego (en la medida de lo posible: como ya se ha visto, siempre es necesario que exista un drenaje desde las zonas regables que evite la acumulación de sales en el suelo). Ya se han comentado algunas estrategias para disminuir (incluso eliminar) los retornos de riego o para evitar su incorporación a las aguas naturales. Junto a ellas, una estrategia fundamental, asequible en medios como el nuestro es la mejora de la eficiencia de riego: es decir, disminuir la fracción de drenaje. En este sentido, como también se ha visto, la utilización de riegos por aspersión o goteo (que permiten regular mejor las aplicaciones de agua y de nutrientes) es una medida que contribuye a preservar la calidad de las aguas naturales.

La importancia de la masa aportada por cada fuente contaminante se traduce en EE.UU. en una aproximación al control de la contaminación conocida como *Masas Totales Máximas Diarias* (TMDL). Esta aproximación consiste en asignar a un tramo de río o cuerpo de agua una concentración máxima admisible de un cierto contaminante (en función de los usos previstos para esa masa de agua), identificar todas las fuentes puntuales y difusas de ese contaminante en su cuenca y asignar a cada fuente una masa máxima que puede emitir para no llegar a exceder la concentración admisible. Esta aproximación requiere un buen inventario de las fuentes contaminantes en la cuenca y un conocimiento adecuado del comportamiento del contaminante en la misma, que muchas veces necesita de la utilización de modelos de simulación.

c) Emisión de contaminantes atmosféricos (gases de efecto invernadero)

Finalmente, por la importancia que está tomando la problemática del calentamiento global, habría que

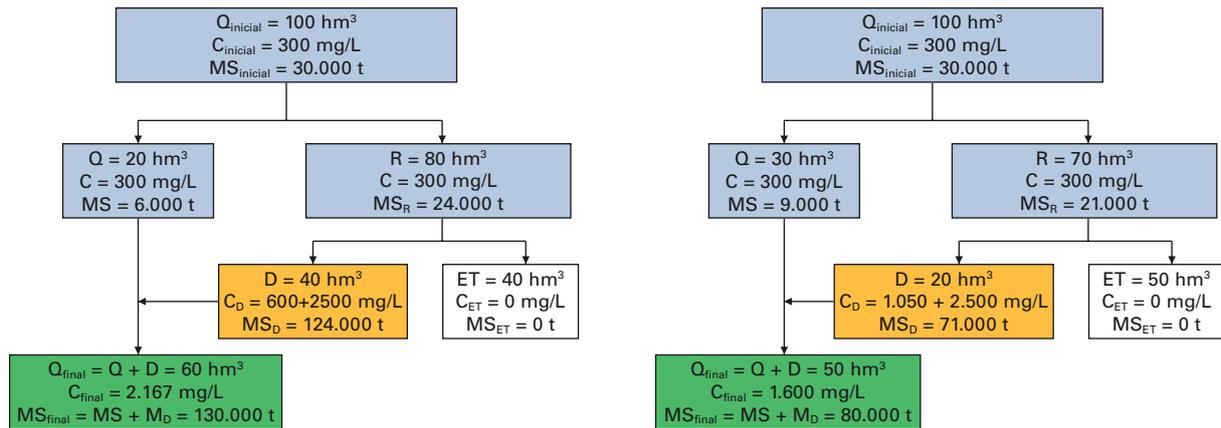


Figura 9. El aumento de la concentración salina en el cauce receptor de los retornos de riego resulta ser mayor en el caso de un drenaje (D) elevado con una concentración baja (izquierda) que cuando el drenaje es muy bajo a pesar de llevar una salinidad más alta, según se muestra en este ejemplo de una zona con yeso regada por superficie (izquierda) o aspersión (derecha) donde las concentraciones (C en mg/L) y las masas de sales (MS, t) se han calculado por balance de masas, añadiendo a la concentración del drenaje 2500 mg/L correspondientes a la saturación en yeso (reflejando el predominio del efecto aporte en la salinidad del drenaje). Ambos ejemplos responden a situaciones típicas en la Cuenca del Ebro: concentración baja del agua de riego (300 mg/L), detracción de las aguas de un río y presencia de yeso. Partiendo de la misma agua disponible ($Q_{inicial}$ con una concentración $C_{inicial}$), a la izquierda se presenta un riego por superficie tradicional, con una fracción consuntiva baja ($ET/R = 50\%$) y a la derecha el mismo regadío en riego por aspersión, con una detracción para riego (R) menor (70 hm^3 en lugar de 80 hm^3) y una fracción consuntiva más elevada ($ET/R = 71\%$). El ejemplo pone manifiesto además que la modernización del regadío dará lugar a una disminución de la cantidad total de agua disponible (mayor ET y por tanto menor D y menor Q_{final}) y a un agua final de mejor calidad (menor concentración del recurso final C_{final}).

considerar entre los efectos externos del regadío la emisión de gases de efecto invernadero: el CO_2 originado por el consumo de combustible para las labores y el riego; el CH_4 (metano) ligado a las explotaciones ganaderas y al cultivo de arroz; y el N_2O , cuya emisión se ve favorecida por una elevada humedad del suelo y por un uso excesivo de fertilizantes nitrogenados. Por el contrario, un manejo adecuado de los suelos regados que incrementara su contenido en materia orgánica (tradicionalmente bajo en nuestro medio) contribuiría a la fijación de C atmosférico y por tanto a paliar el calentamiento global.

CONCLUSIONES

El regadío es una práctica necesaria en climas semiáridos para mantener una producción agrícola suficiente y estable y un nivel de vida adecuado para la población rural, así como una cierta densidad de población en áreas rurales.

Por otro lado, el regadío implica la utilización de un volumen importante de agua (en zonas donde normalmente no es un recurso abundante) consumiendo una parte (y por tanto disminuyendo los recursos globales) y devolviendo la parte no utilizada con una calidad peor que la del agua detrída. El empeoramiento de la calidad del agua de drenaje obedece al lavado de sales de los suelos regados y al arrastre de agroquímicos empleados en la agricultura de regadío, normalmente intensiva. El lavado de

sales de los suelos regados, aunque contribuya a la salinización de los cauces receptores, es necesario para evitar la salinización de los suelos; un factor que ha contribuido a la inviabilidad del riego en numerosas zonas regables del mundo.

La norma general clave para impedir la salinización (y en parte la sodificación) de los suelos regados es mantener un drenaje adecuado. Las claves para reducir la contaminación de las aguas por los retornos de riego son (i) la reducción de los retornos mediante riegos más eficientes y (ii) el uso racional de los medios de producción (fertilizantes y plaguicidas) utilizando dosis adecuadas a las necesidades de los cultivos y eligiendo correctamente las fechas de aplicación para evitar el lavado por las lluvias y sobre todo por el riego.

Asegurar la sostenibilidad del regadío, es decir el mantenimiento a largo plazo de una productividad suficiente con unos costes ambientales y sociales aceptables, requiere un control continuo de la calidad de los retornos de riego y de las propiedades de los suelos (nivel freático, salinidad y sodicidad) que permita identificar los problemas ambientales conforme vayan surgiendo y profundizar en la relación entre las prácticas de manejo del riego y sus consecuencias ambientales. En este sentido es imprescindible la continuidad de las redes de control puestas en marcha por las comunidades generales de regantes y la Confederación Hidrográfica del Ebro.