

TRANSFORMACION EN REGADIO DE ZONAS CON CONDICIONES NATURALES LIMITANTES. EVALUACION DE LA SOSTENIBILIDAD DE MONEGROS II

Por
INMACULADA ASTORQUIZA (*)

I. INTRODUCCION

Los proyectos de transformación en regadío requieren evaluaciones precisas a fin de calibrar su impacto económico, físico y medio ambiental bajo riegos futuros; de manera especial cuando son planeados para zonas áridas, con áreas de desagüe natural limitado y sales en el suelo. Los problemas encontrados y la experiencia acumulada en este tipo de zonas regadas del mundo así lo recomienda, ya que la elevación de la capa freática y sus problemas concomitantes de encharcamiento, aumento de salinización de los suelos y reducción de rendimientos, (debido a que el agua salina de retorno va acumulándose hasta alcanzar la zona de raíces de los cultivos), se convierten en problemas para riegos futuros a menos que se adopten prácticas de riego y políticas de regulación apropiadas con suficiente previsión.

La realización de estudios que contengan simulaciones físico-económicas, con carácter anticipado, es una práctica poco habitual

(*) Departamento de Economía. Universidad Pública de Navarra.
– Revista de Estudios Agro-Sociales. Núm. 167 (enero-marzo 1994).

en la fase de elaboración y evaluación de dichos proyectos. Tradicionalmente, los planificadores han solido emplear y recomendar criterios «exclusivamente» económicos para evaluar y dirigir la explotación de recursos de agua. El análisis Coste-Beneficio ha sido un criterio de decisión utilizado como indicador de la eficiencia económica de dichos proyectos, una vez éstos han sido diseñados. El análisis Input-Output, también ha sido empleado para completar el método anterior, ya que puede ser usado para identificar y valorar los impactos secundarios (cambios en la producción bruta, empleo o rendimientos totales del capital) entre los sectores de una región.

Muy pocos análisis relacionados con planes de desarrollo de nuevos regadíos han combinado sistemas de flujos físicos y económicos en sus estudios de evaluación ex-ante de la evolución de los recursos naturales involucrados en el proceso productivo.

Normalmente este tipo de análisis integradores e interdisciplinares, únicamente suelen ser acometidos a posteriori cuando la complejidad y severidad de los problemas arriba citados se presentan en parte/totalidad de la zona en riego, requiriendo, asimismo, respuestas complejas. Pero una vez alcanzado dicho estadio, sólo caben tomar soluciones ex-post de carácter irreversible como por ejemplo la instalación de sistemas de drenaje; solución, ésta, muy controvertida debido a que a sus elevados costes de inversión se añaden problemas derivados de la contaminación de los cursos del agua que reciben las descargas de los flujos salinos de retorno del riego.

Lo novedoso del presente trabajo radica en la incorporación de ambos tipos de flujos en un único sistema integrado abierto y en su aplicación al análisis de una problemática real: la simulación del comportamiento de los suelos más críticos, en razón de su salinidad ($8 \text{ dS/m} \leq \text{EC} \leq 16 \text{ dS/m}$) y escaso drenaje natural, del proyecto de transformación de Monegros II bajo riegos futuros. Las características geológicas de estos suelos y más concretamente la profundidad a que se encuentra su horizonte impermeable pueden llegar a ser factores incluso más limitantes que su salinidad.

Como la evolución futura de la capa freática y la necesidad de futuras inversiones en drenaje dependen básicamente de las características geológicas y de la tasa de percolación profunda tras la puesta en riego (variable, ésta, no observable a simple vista) el estudio concede

gran importancia a la estimación y minimización del volumen de percolación profunda. La evolución de la capa freática que se formará tras la puesta en riego de estos suelos tiene por tanto un carácter decisivo para asegurar la sostenibilidad del proyecto en su conjunto.

Este estudio considera varias estrategias de gestión para la conservación/ahorro del recurso de agua, las cuales tratan de reducir la tasa de percolación profunda con el fin de retrasar, si fuera posible para siempre, la necesidad de costosos y ambientalmente cuestionables sistemas de drenaje y recogida/depósito de efluentes. Cada estrategia de gestión está orientada hacia la minimización de los efectos colaterales negativos que el desarrollo de nuevos regadíos puede acusar cuando el suelo contiene sales y su capacidad natural de desagüe es limitado. Se consideran cuatro alternativas: instalación y mantenimiento óptimo de sistemas de riego a presión de alta eficiencia, sistemas de rotación de cultivos y limitación de la percolación profunda generada, así como políticas regulatorias de la percolación basadas en esquemas de penalización/subsidio.

Este análisis, aunque aplicado de manera específica al proyecto de transformación en regadío de Monegros II, es de carácter general y podría válido para la evaluación de cualquier otro proyecto de transformación en regadío que tuviese problemas similares; muy típicos, por otra parte, en áreas semiáridas.

II. PROBLEMATICA DE LAS ZONAS ANALIZADAS

Los estudios elaborados por RENASA (1979 y 1981) muestran que el 32 por ciento de los suelos de la zona de estudio no están afectados de sales, el 29 por ciento tiene una conductividad eléctrica media del estrato saturado del suelo (EC_e) de 3 dS/m (suelos clasificados como n_1), el 24 por ciento tiene un $EC_e = 6$ dS/m (suelos clasificados como n_2) y finalmente el 15 por ciento tiene un $EC_e = 12$ dS/m (suelos clasificados como n_3).

En este trabajo sólo se consideran los suelos más salinos clasificados como n_3 , a pesar de que sólo representan el 15 por ciento de los suelos a transformar. La razón de ello estriba en su carácter especialmente crítico ya que normalmente este tipo de suelos altamente sali-

nos suelen tener mal drenaje natural, pues de lo contrario se hubiesen lavado a lo largo de los miles de años transcurridos.

Uno de los problemas detectados al realizar este estudio consiste en el desigual conocimiento que se tiene de la hidrogeología de cada uno de los sectores de Monegros II. La terrible variabilidad espacial de sus suelos obliga a un muestreo individualizado de ellos si se desea conocer con precisión la forma y distribución de las distintas capas subsuperficiales, zonas cársticas, etc.; información vital, por otra parte, para conocer la futura distribución espacial, profundidad desde el nivel del suelo y extensión de las capas freáticas de agua que posiblemente se vayan a formar tras la puesta en riego. La realización de un estudio de semejantes proporciones se topa con numerosas limitaciones; sin embargo, sería conveniente un mayor esfuerzo en este sentido, ya que la geología puede ser el factor limitante para la puesta en riego de muchas áreas de Monegros II, mucho más incluso que las sales presentes en el suelo.

Una información edafológica más precisa ayudaría a elaborar simulaciones más pormenorizadas espacialmente y por tanto más significativas. No obstante, los datos actualmente disponibles a través de los expertos en la hidrogeología de Monegros recomiendan el establecimiento de las siguientes hipótesis simplificadoras:

- a) cuenca cerrada,
- b) porosidad media del perfil del suelo situada entre un mínimo de 5 por ciento y un máximo de 30 por ciento.
- c) horizonte impermeable situado entre 25 y 5 metros de profundidad desde la superficie, según la cota del terreno sea más elevada (al norte de la Carretera Nacional II) o menos (al sur de la mencionada Carretera),
- d) horizonte impermeable continuo y horizontal (sin zonas cársticas),

También se estableció, con fines de simulación, un *volumen máximo permitido* de percolación profunda (2.500 m³/ha) cuyo límite no se permite rebasar, excepto el primer año de actividad (dedicado exclusivamente al lavado de suelos) para el cual se establece un límite de 5.000 m³/ha. Estas asunciones fueron empleadas a posteriori en el estudio de la evolución de la capa freática.

Como los drenajes naturales del conjunto de la zona son bastante escasos, las obras de transformación incorporan la creación de una red principal de drenajes para evitar una posible elevación de la capa freática tras la puesta en riego. Los drenajes principales desaguan en los grandes colectores que separan los 21 sectores hidráulicos en que se ha dividido la superficie declarada regable de la zona, así las aguas residuales del riego son encauzadas y vertidas en los ríos que bordean la zona (Ebro, Cinca y Alcanadre).

El Plan General de Transformación no contempla el desarrollo de una red completa de drenajes a nivel de parcela, debido a lo costoso y en algunos casos innecesario de esta infraestructura. Por ello será el propio agricultor quien acometa estas inversiones cuando la misma práctica del riego vaya indicando su necesidad.

III. METODOLOGIA

Se ha elaborado un modelo multiestacional tal que las observaciones de sus variables tienen una frecuencia estacional o de campaña de producción de los cultivos; dicho modelo incorpora la dinámica de la salinidad del suelo y del capital en los distintos equipos de riego considerados, así como las rotaciones de cultivos; utilizando para ello un Sistema de Control Dinámico.

El problema de optimización dinámica ha sido formulado como un problema de programación matemática no lineal (con no-linealidades en la función objetivo y en las restricciones relativas a los rendimientos, salinidad del suelo y de la percolación profunda, capital de riego, agua aplicada y volumen medio de percolación profunda generada) y solucionada empleando el programa GAMS.

Se han considerado seis actividades diferentes: 1) lavado, se refiere a la superficie de cultivo dejada en barbecho en una campaña determinada con fines de lixiviado –lavado de las sales del suelo– pero que puede volver a ser puesta en producción en campañas siguientes; y el cultivo de 2) maíz, 3) cebada, 4) alfalfa, 5) girasol, y 6) trigo. A pesar de tratarse de cultivos herbáceos mayormente excedentarios, han sido tomados en consideración tanto por la vocación cerealista y ganadera de la zona como por la escasez de mano de

obra e infraestructuras necesarias para la producción de otro tipo de cultivos más intensivos. El análisis no considera las políticas de reciente implantación de abandono de tierras de cultivo y ayudas correspondientes, por lo que los resultados económicos obtenidos podrían estar algo sobrevalorados.

Este análisis dinámico incorpora también la utilización de la Programación Matemática Positiva (PMP) (Howitt, 1991) que, en nuestro caso, ha sido diseñada para permitir que los cultivos roten a medida que va cambiando la salinidad del suelo. De esta manera, el modelo busca los niveles de cultivo óptimos basados en criterios físicos y económicos en lugar de rotaciones fijadas exógenamente tal y como se hace habitualmente.

Se presenta un modelo de maximización del ingreso neto regional para los siguientes sistemas de riego: 1) de aspersión de cobertura total enterrada, 2) de aspersión de pivot central, 3) de aspersión de máquina lateral, 4) de aspersión semifijo y 5) de goteo. La función objetivo es maximizada respecto a la superficie y a la cantidad de agua asignada a cada actividad así como respecto a la inversión en mantenimiento del equipo de riego. Las variables dinámicas críticas del modelo son la salinidad del suelo y el capital en equipo de riego.

El análisis de decisión evalúa el uso de recursos, el output producido (rendimientos comercializables y volumen de percolación profunda), así como los impactos físicos y los efectos sobre los ingresos derivados de la utilización de tecnologías de riego alternativas en una zona a transformar en regadío de limitado drenaje natural. Finalmente, estos resultados son empleados para valorar las distintas opciones tecnológicas.

La mayoría de los modelos estacionales (donde la campaña de producción es la base de sus observaciones) elaborados consideran la salinidad del suelo como proveniente del agua de riego. Este es el caso de los modelos estacionales de régimen permanente de Letey *et al.*, (1985), Letey y Dinar (1986) y Dinar *et al.*, (1991). Otros modelos como los de Vinten *et al.*, (1991) y Knapp (1991) modifican los modelos estacionales empleando ecuaciones dinámicas para la salinidad del suelo asumiendo condiciones de flujo-pistón. Sin embargo, dichas asunciones no son apropiadas para el caso de Monegros II, donde las sales no provienen de la acumulación por

aplicación de agua salina –el agua de riego de que se abastece Monegros II es agua superficial de excelente calidad (0,3 dS/m) que es traída desde los Pirineos– sino que están presentes en sus suelos en forma de depósitos minerales naturales más lentos en disolver. En consecuencia, se adoptó la fórmula de Hoffman (1980) por considerarla más adecuada a nuestro problema ya que trata de la eficiencia del lixiviado unidimensional en el transporte de sales para la recuperación de suelos salinos la cual, además, es fácilmente dinamizable.

La función de producción empleada tiene su base en la respuesta de crecimiento de las plantas a la salinidad sugerida por Van Genuchten y Hoffman (1984) y que tiene una forma sigmoïdal.

El capital en tecnología de riego es incorporado utilizando el Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC) el cual mide la uniformidad en la aplicación de agua de cada sistema de riego como una medida del efecto del capital; tecnologías con valores de CUC más elevados tienen eficiencias de riego mayores, tasas de percolación inferiores y en consecuencia son consideradas más avanzadas. Se está forzando al CUC a permanecer en su máximo potencial físico a través de un mantenimiento apropiado del sistema de riego con el fin de aplicar volúmenes óptimos de agua, reducir la percolación más allá de la zona de raíces y minimizar los efectos secundarios negativos habituales.

El análisis asume que la tecnología de riego ha sido instalada ya, para el primer año del horizonte temporal considerado, después que el desarrollo de la infraestructura primaria y secundaria de riego ha sido finalizado y los agricultores están aún pagando los costes anualizados de estas inversiones iniciales. No obstante, la ecuación de movimiento para el capital de riego afirma que los productores deben mantener sus inversiones para evitar el deterioro físico del sistema existente y mantenerlo en condiciones óptimas.

III.1. *Políticas de control del volumen de percolación profunda*

El procedimiento de optimización dinámica descrito determina la trayectoria de las mencionadas variables flujo en el largo plazo, así como sus valores sombra dinámicos. La información sobre costes y

beneficios sombra es de gran utilidad para elaborar instrumentos reguladores óptimos, establecer límites a las emisiones en función de la capacidad de absorción de los sistemas físicos y, en definitiva, para elaborar políticas que protejan la sostenibilidad del proyecto de transformación en regadío y el medio ambiente, ya que variables tan vitales como la cantidad de agua que percola debajo de la zona de raíces no son observables a simple vista y necesitan, por tanto, ser estimadas.

El carácter no-puntual de dichos flujos de retorno agrícolas hace inoperantes las políticas tradicionales basadas en emisiones, ya que éstas necesitan identificar la contribución de cada agente económico (agricultor) a las externalidades (elevación del nivel de la capa freática). Por tanto, debido a problemas de información, el control eficaz de la percolación de origen no-puntual requiere de políticas regionales que no dependan de la cuantificación de efluente generado por cada agricultor sino que controlen los inputs y los procesos de producción. Se requieren funciones precisas que describan la relación entre inputs (agua aplicada) y efluentes (percolación profunda) para cada cultivo, a fin de determinar políticas (esquemas de penalizaciones y/o subsidios) óptimas. El uso de modelos físicos (hidrosalinos) reduce la incertidumbre sobre la magnitud de las descargas de origen no-puntual. Por otra parte, diversos estudios sugieren la adopción de tecnologías de baja emisión (elevada CUC/eficiencia), ahorradoras de recursos, para reducir los problemas medioambientales.

Para la aplicación de la política de regulación medioambiental pueden elegirse diferentes instrumentos, aunque no mutuamente excluyentes, que han de ser administrados por una agencia que controle las emisiones. En este trabajo se consideran varios tipos de políticas intertemporales reguladoras orientadas a la reducción del volumen de percolación profunda:

- a) un incremento lineal de la tarifa o precio del agua de riego. La primera, de probable aplicación, es de 2.8 ptas./m³; y la segunda de 5 ptas./m³ es la que se emplea como escenario alternativo en el análisis de políticas,
 - b) un impuesto sobre el volumen medio de percolación profunda cuando éste sobrepasa una cuota crítica estimada «soporta-
-

- ble» por la región (5.000 m³/ha para el primer año de lavado y 2.500 m³/ha para el resto del horizonte temporal),
- c) una subvención que reduce los costes de inversión en mantenimiento del equipo de riego necesarios para contrarrestar la depreciación del capital (CUC) y así poder operar a niveles de funcionamiento óptimo, y
 - d) un incentivo que incrementa el beneficio marginal neto (beneficio marginal-coste marginal) que se obtiene de mantener el CUC de las tecnologías de riego a niveles óptimos.

Una vez su cuantía ha sido estimada, los citados instrumentos de política son incorporados en el modelo el cual es solucionado de nuevo.

El modelo permitiría además el empleo de otros instrumentos de política, tales como precios del agua de riego por escalas de consumo, restricciones y/o impuestos sobre la concentración salina de las descargas, etc., pero no se consideraron en este trabajo.

III.2. *Objetivos*

Debido a que los drenajes naturales son escasos en algunas áreas de Monegros II, se han considerado varias estrategias de gestión y conservación de recursos para reducir el volumen de percolación: 1) instalación y mantenimiento óptimo de sistemas alta eficiencia de riego a presión, 2) limitación del volumen medio de percolación profunda permitido, 3) diferentes políticas de regulación de dichos volúmenes, y 4) rotación de cultivos. El objetivo del trabajo consiste en minimizar el volumen de agua aplicada por unidad de superficie cuando se trata de recuperar suelos altamente salinos y de drenaje natural limitado, tratando de retardar o evitar la necesidad de instalaciones de drenaje subterráneas, a nivel de parcela, como consecuencia del ascenso de la capa freática y, en definitiva, de garantizar la sostenibilidad del proyecto en su conjunto.

Las simulaciones realizadas han de ayudar a los responsables políticos/agencia de control en la toma de decisiones sobre: a) las tecnologías y prácticas de riego a ser impulsadas y b) la selección de políticas de carácter global que regulen las interacciones entre agricultura, recursos y medio ambiente.

IV. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

De los cultivos considerados, la cebada y el trigo son los más tolerantes a la salinidad del suelo, por ello son empleados para «colonizar» suelos de alto contenido salino en los estadios iniciales de la transformación en regadío. La superficie de los cultivos sensibles está por debajo de la cifra obtenida para el caso base (sin sales en el suelo) en el año inicial de su cultivo, pero después crece y sustituye parcialmente la tierra dedicadas a los cultivos más tolerantes y menos rentables. Las proporciones de tierra dedicadas a cada cultivo cambian en función de las tecnologías y los diferentes escenarios de tarifas del agua.

Dependiendo de la tarifa del agua se observan dos estrategias diferentes para lavado de suelos salinos. El lavado, como actividad independiente, es más extensamente empleado para tarifas de agua altas, ya que los agricultores pueden eliminar las sales más rápidamente, reducir el volumen de agua empleada y, en consecuencia, recuperar más rápidamente las pérdidas iniciales de ingresos. Sin embargo, cuando las tarifas del agua son más bajas la estrategia mejor (aunque no la única ya que la actividad de lavado sigue vigente) consiste en aplicar una dosis de agua mayor a los cultivos; el maíz es el «cultivo de lavado» por excelencia, ya que es el más rentable de los considerados. Por otro lado, los sistemas con mayores CUCs pueden permitirse emplear una proporción de agua superior debido a su menor uso base de agua respecto a otros sistemas.

La trayectoria óptima de los rendimientos no se ve afectada por ninguna política de las examinadas. La mayoría de los cultivos están próximos a alcanzar sus rendimientos máximos para la tercera campaña desde el inicio de su cultivo. Como se ha mencionado anteriormente, la cebada y el trigo son los cultivos con menores pérdidas debido a su alta tolerancia a las sales; los cultivos más sensibles tienen pérdidas sustanciales de rendimientos al comienzo de su vida productiva.

La mayoría de las variables físicas, tales como la salinidad del suelo, y la cantidad media y concentración salina de la percolación profunda tienen un comportamiento bastante similar para todos los sistemas de aspersión (cobertura total enterrada, pivot central, máquina lateral y semifijo) por un lado, y el sistema de goteo por el otro, independiente de la política de control empleada.

La tecnología más sensible a los cambios en tarifas del agua es el sistema semifijo ya que normalmente necesita un período más largo para alcanzar el estado estacionario con tarifas elevadas. De modo general, el riego por goteo es el sistema más eficiente para tratar situaciones de alta salinidad y mal drenaje ya que elimina las sales algo más rápidamente y genera menor volumen de percolación profunda; aunque la concentración salina de la percolación profunda con riego por goteo es superior en los dos primeros períodos, se hace menor después.

El coste de oportunidad de la salinidad del suelo disminuye en el tiempo y tiende a cero al final del horizonte temporal. Sin embargo, en términos relativos, es superior (más negativo) cuando el precio del agua es bajo. Comparada con otras tecnologías, el sistema de goteo tiene, igualmente, un coste de oportunidad más bajo, aunque en el caso de tarifas altas el sistema semifijo tiene costes más bajos todavía.

Los muestreos hidrogeológicos llevados a cabo en Monegros II sitúan la capa impermeable en un intervalo que oscila entre los 5 y 25 metros de profundidad aproximadamente y la porosidad del suelo en una banda entre el 5 y el 30 por ciento, según zonas. En base a esta banda de valores extremos observados en la zona y a los volúmenes medios *óptimos* de percolación profunda obtenidos de la simulación cabe concluir que resulta inevitable la instalación de sistemas de drenaje en todos los escenarios contemplados. Cuando el horizonte impermeable está a 5 metros de profundidad, el nivel freático alcanza la zona de raíces en menos de un año con la porosidad del suelo más desfavorable (5 por ciento), y en 3 ó 4 años (según tecnología de riego empleada) si ésta es del 30 por ciento; exigiendo inversiones en drenaje bastante inmediatas. Cuando dicho perfil está a niveles más profundos (25 m) el nivel freático alcanza la zona de raíces a partir del tercer o cuarto año en el caso más desfavorable, pero tarda entre 43 y 54 años en alcanzarla cuando la porosidad del suelo es del 30 por ciento (cuadro 1).

La información adicional procedente del cuadro 2, especialmente cuando se combina con la del cuadro 3 sobre ingresos netos por hectárea, nos provee una imagen bastante certera sobre la rentabilidad de estas zonas a transformar. Los suelos con bajas porosidades son los que necesitan una mayor inversión en drenaje y con mayor rapidez, debido a lo cual, dichas inversiones prácticamente coinciden en

Cuadro 1

PERIODO EN EL QUE LA CAPA FREÁTICA ASCENDERÍA HASTA LA ZONA DE RAICES Y SERÍA NECESARIO INVERTIR EN DRENAJE (AÑOS)

Profundidad capa impermeable (m)	Porosidad Media horizontes geológicos	Todos los sistemas de aspersión	Sistema de goteo
25	0,3	43	54
	0,05	3	4
5	0,3	3	4
	0,05	< 1	< 1

Cuadro 2

INVERSION EN DRENAJE SEGUN PROFUNDIDAD DE LA CAPA IMPERMEABLE Y POROSIDAD DEL SUELO

Prof. capa impermeable (m)	Porosidad	Longitud drenes (m)	Distancias drenes (m)	Inversión drenaje (Pts/ha)
25	0,3	40	258,4	19.824,7
	0,05	40	27,0	176.786,2
5	0,3	40	137,2	37.384,6
	0,05	40	26,8	191.440,9

Nota: la distancia entre drenes ha sido calculada según las fórmulas de Van Beers y Glover-Dumm.

el tiempo con las inversiones en equipo de riego, lo cual hace más crítica la viabilidad de la empresa agraria que los soporta. Los suelos con mayor porosidad necesitan una inversión en drenaje notablemente inferior, aunque bastante inmediata cuando el horizonte impermeable se halla próximo de la superficie del suelo (5 m). El escenario más favorable (p.c.i.= 25 m y p= 30 por ciento) no comienza a penalizar los ingresos hasta 43-54 años después de su transformación y con una cuantía no muy elevada por lo que no hace peligrar la viabilidad de las explotaciones.

La inversión en CUC tiene una trayectoria con pendiente ascendente, especialmente alta para las tecnologías de máquina lateral y pivot central. La tendencia opuesta puede ser observada, sin embargo, en el beneficio marginal neto del CUC.

La trayectoria de los beneficios netos marginales del CUC obtenida tras la implantación de las diferentes políticas de control de emisiones es bastante similar para impuestos, subvenciones y diferentes tarifas de agua; más altos en los primeros años tras el estable-

cimiento del riego pero tendentes a cero, a medida que crece la inversión, hacia el final del horizonte temporal. Sin embargo, bajo el escenario de incentivos, el máximo beneficio sombra aparece en el medio plazo cuando los costes empiezan a crecer más rápido que los beneficios y los incentivos por unidad de CUC establecidos también están disminuyendo.

Las políticas de tarifas de agua elevadas e impuestos tienen similares beneficios marginales netos, excepto para el sistema semifijo que tiene mayor beneficio marginal neto en el escenario de tarifas. Dicho beneficio marginal neto obtenido del CUC es ligeramente mayor para impuestos y precios que para subvenciones en todas las tecnologías, lo cual es un resultado lógico, ya que estas cargas adicionales fuerzan al agricultor a valorar incluso en mayor medida la eficiencia de riego. Los resultados derivados de la comparación de subvenciones e incentivos no son tan evidentes, ya que varían en el tiempo y en función de las tecnologías de riego, aunque puede decirse que los beneficios marginales netos del CUC son superiores más frecuentemente para las subvenciones.

Según se deduce de los resultados obtenidos respecto al beneficio marginal neto de operar a niveles máximos de CUC (que impiden el deterioro del equipo), podemos deducir que las políticas de regulación que más impulsan o que son más eficientes para controlar el volumen medio de percolación profunda pueden ser clasificadas por el siguiente orden: 1) tarifas de agua más elevadas, 2) impuestos, 3) subvenciones y 4) incentivos.

Tomando en consideración los resultados físicos y económicos del modelo, se puede establecer que los sistemas de riego por goteo y cobertura total enterrada son la mejor elección cuando las condiciones de drenaje son limitadas. El sistema de pivot central obtiene ingresos netos positivos en la mayoría de los escenarios considerados excepto para las tarifas de agua superiores; el sistema de aspersión semifijo obtiene ingresos netos positivos en los escenarios más favorables, es decir, con subvenciones e incentivos pero no en los restantes. Finalmente, el sistema de máquina lateral obtiene resultados negativos en todos los escenarios excluido el de subvenciones, debido a sus elevados requerimientos de capital inicial e inversión para mantener el sistema en óptimas condiciones (cuadro 3).

Cuadro 3
 VALOR PRESENTE DE LOS INGRESOS NETOS POR HECTAREA PARA DISTINTAS TECNOLOGIAS
 Y POLITICAS DE REGULACION DEL VOLUMEN DE PERCOLACION PROFUNDA (PTAS/HA)

	Sistema de aspersión de cobertura total enterrada	Sistema de aspersión de pivot central	Sistema de aspersión de máquina lateral	Sistema de aspersión semifijo	Sistema de goteo
Precio Agua 2,8 ptas./m ³	318.757	184.430	-198.763	105.742	545.243
Precio Agua 5 ptas./m ³	73.059	-60.714	-443.187	-123.023	307.655
Impuesto (por m ³ que ADP ≥ 2.500)	174.973	40.944	337.326	-9.935	469.179
Subvención (por unidad de CUC)	336.966	312.416	2.138	170.319	570.647
Incentivo (por unidad de CUC)	356.777	258.256	-82.879	142.994	576.750

Las políticas de control de volúmenes medios de percolación profunda que más penalizan los ingresos netos por hectárea vienen clasificadas por el siguiente orden: 1) tarifas de agua más elevadas, 2) impuestos, 3) subvenciones, 4) incentivos. Aunque el orden de estas dos últimas se invierte para pivot central, máquina lateral y semifijo. *De donde cabe concluir que las políticas más eficientes para reducir el volumen de percolación son lógicamente, a su vez, las que más penalizan los ingresos de los agricultores.*

Los impuestos producen mejores resultados económicos que la política de precios y con similar estímulo a la inversión en mantenimiento del equipo (excepto para el sistema semifijo) según puede deducirse de los beneficios marginales netos del CUC. Las subvenciones e incentivos ofrecen ingresos netos por hectárea superiores pero la capacidad para evitar comportamientos ineficientes de los agricultores es ligeramente más baja que en los escenarios anteriores. La elección entre subsidios e incentivos no es tan evidente, ya que el comportamiento de los ingresos netos por hectárea y del beneficio marginal neto del CUC cambia en función de las tecnologías y del tiempo. Estos resultados muestran *las contrapartidas aparentes entre ingresos netos y beneficios marginales netos del CUC cuando se comparan diferentes políticas.*

No obstante, el interés de estos resultados queda parcialmente ensombrecido tras constatar la rápida elevación de los niveles freáticos hasta la zona de raíces de los cultivos a pesar de forzar niveles óptimos de funcionamiento de los equipos de riego, y de implantar políticas de control sobre las emisiones. La necesidad casi inmediata de invertir en costosas infraestructuras de drenaje a nivel de parcela en los suelos menos porosos y con horizontes impermeables cercanos a la superficie pone en cuestión la rentabilidad/sostenibilidad de su puesta en riego y hace ser pesimistas a la hora de evaluar la conveniencia de transformar los suelos más problemáticos.

Si se observan los ingresos netos anuales por hectárea del cuadro 3 se deduce rápidamente que el agricultor no es capaz de asumir, bajo la mayoría de las tecnologías (a excepción del sistema de goteo) y características edafológicas consideradas, aquellas políticas de control de emisiones penalizadoras de los ingresos (precios de agua elevados y/o impuestos), y adicionales costes financieros derivados de

las inversiones en drenaje, a pesar de las condiciones ventajosas de los créditos concedidos por la Administración y Banca Privada, para invertir en este tipo de infraestructuras.

Otro aspecto importante es que el presente análisis no ha considerado el impacto sobre los ingresos netos de la política de abandono de tierras de cultivo impuesto recientemente por la PAC. Por tanto, a la luz de los resultados obtenidos, somos pesimistas a la hora de evaluar la conveniencia económica y medio ambiental de la transformación de las áreas más problemáticas con alto contenido en sales y deficiente drenaje de Monegros II.

BIBLIOGRAFIA

ALBERTO, F.; ARAGÜES, R.; FACI, J.; FERERES, E.; MACHÍN, J.; HENDERSON, D. W. y TANJI, K. K. (1989). «Salinity studies in the Ebro basin». *Final Report. Comité Conjunto Hispano-Norteamericano para la Cooperación Científica y Técnica*.

ASTORQUIZA, I. y HOWITT, R. E. (1993). «Irrigation Development, Crop Production and Technology Choice under Saline and Limited Drainage Conditions: Application to Monegros II (Spain)». *Water Resources Research* (En proceso de revisión). 20 p.

ASTORQUIZA, I. y HOWITT, R. E. (1993). «Economía de la transformación en regadío de suelos salinos en Monegros II». Premio Jordán de Asso 1993. (Próxima Publicación). 101 p.

ASTORQUIZA, I. y HOWITT, R. E. (1993). «Irrigation Development under Limiting Environmental Conditions: Policy Analysis for Non-Point Source Control». *Fourth Annual Conference of the European Association of Environmental and Resource Economists (EAERE)*. Fontainebleau. Francia.

BARIOS, J. (1989). «Estudio geohidrológico de los sectores VIII, IX y XI de la zona regable de Monegros II. (Zaragoza y Huesca)». *MAPA-IRYDA*, 159 p.

CUELLAR, N. y CAMA, J. (1992). «Caracterización y modelización de la evolución hidrogeoquímica en la zona evaporítica del complejo lagunar de Monegros (Bujaraloz)». *26 Curso Internacional de Hidrología Subterránea*. 13 p.

DINAR, A.; RHOADES, J. D.; NASH, P. y WAGGONER, B. L. (1991). «Production functions relating crop yield, water quality and quantity, soil salinity and drainage volume». *Agricultural Water Management*, n.º 19, pp. 51-66.

HOFFMAN, G. J. (1980). «Guidelines for the reclamation of salt-affected soils». G. A. O'Connor, ed. 2nd. Inter-American Conference on Salinity and Water Management Technology, Juarez, México. 11-12 Dec, 1980, pp. 49-64.

HOWITT, R. E. (1991). «Calibrated models for agricultural production and environmental analysis». Department of Agricultural Economics. U. C. Davis. *Working Paper*, n.º 91-10.

IRYDA (1985). «Plan general de transformación de la zona regable de la segunda parte del canal de Monegros (Zaragoza y Huesca)». 83 p.

KNAPP, K. C. (1991). «Optimal intertemporal irrigation management under saline, limited drainage conditions». A. Dinar and D. Zilberman eds., *The Economics and Management of Water and Drainage in Agriculture*. Kluwer Academic Publishers, pp. 599-616.

LETEY, J. (1991). «Crop-water production function and the problems of drainage and salinity». A. Dinar and D. Zilberman eds. *The Economics and Management of Water and Drainage in Agriculture*. Kluwer Academic Publishers, pp. 209-227.

LETEY, J. y DINAR, A. (1986). «Simulated crop-water production functions for several crops when irrigated with saline waters». *Hilgardia*. vol. 54, n.º 1, 30 p.

RENASA, (1981). «Estudio de suelos de la zona de Monegros II, (Zaragoza y Huesca)». 55 p.

RENASA, (1979). «Estudio de reconocimiento detallado de suelos en la zona de Monegros II (Zaragoza y Huesca)», 97 p.

SAMPER, J.; CUSTODIO, E.; BAYO, A.; BADIELLA, P.; PONCELA, R.; MANZANO, M. y GARCÍA, M. A. (1992). «Estudio geohidrológico y análisis preliminar del impacto ambiental en los sectores VIII, IX, XI de la zona regable de Monegros II». *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, tomo XVI, pp. 215-228.

SAMPER, J.; CUSTODIO, E. y GARCÍA, M. A. (1993). «Preliminary isotopic study of groundwater salinity variations in the closed-basin semiarid area of los Monegros, Spain». *International Symposium on Applications of Isotope Techniques in Studying Past and Current Environmental Changes in the Hydrosphere and the Atmosphere*. Vienna. Austria. 18 p.

VAN GENUCHTEN, M. Th. y HOFFMAN, G. J. (1984). «Analysis of crop salt tolerance data». *Soil Salinity under Irrigation-Process and Management*. I. Shainberg and J. Shalhevet, eds. Ecological studies 51, Springer-Verlag, N. Y. pp 258-271.

VINTEN, A. J. A.; FRENKEL, H.; SHALHEVET, J. y ELSTON, D. A. (1991). «Calibration and validation of a modified steady-state model of crop response to saline water irrigation under conditions of transient root zone salinity». *Journal of Contaminant Hydrology*, n.º 7. pp. 123-144.

RESUMEN

Los proyectos de transformación en regadío en tierras semiáridas con zonas salinas y de escaso drenaje natural requieren ser evaluadas cuidadosamente en base a su impacto económico, físico y medioambiental bajo riegos futuros.

En este tipo de áreas problemáticas el control del volumen de Percolación Profunda se convierte en el factor determinante para garantizar la sostenibilidad del proyecto y del medio natural. Debido a la naturaleza dinámica de la percolación profunda y su gestión, se emplea un Sistema de Control Dinámico que incorpora un submodelo económico y un submodelo físico (hidrosalino) en un único sistema integrado, como método de solución.

El estudio se basa en un modelo de maximización del margen bruto regional que considera seis actividades/cultivos diferentes, cinco tecnologías de riego y diversas estrategias de gestión ahorradoras del recurso agua orientadas a retrasar, todo lo posible, la necesidad de costosos y ambientalmente cuestionables sistemas

de drenaje. Las estrategias consideradas son las siguientes: a) instalación y mantenimiento óptimo de sistemas de riego a presión de alta eficiencia; b) limitación del volumen de percolación profunda generada; c) rotaciones de cultivos y d) políticas de regulación (precios agua de riego, subvenciones a la inversión en mantenimiento de la maquinaria de riego, impuestos que penalizan cuando la percolación profunda excede el límite crítico establecido, etc.).

Este análisis puede servir de ayuda a los responsables políticos en la elección de aquellas tecnologías de riego y políticas de regulación más apropiadas, ya que los resultados muestran las contrapartidas entre los márgenes brutos obtenidos en estas zonas y los beneficios marginados netos de operar a niveles máximos de eficiencia de riego, para las diferentes tecnologías y políticas de regulación.

RESUME

Les projets d'irrigation des terres semi-arides, ayant des zones salines et un faible drainage naturel, requièrent une évaluation soignée, fondée sur l'étude de l'impact économique, physique et sur l'environnement pouvant en découler.

Dans ce type de zones problématiques, le contrôle du volume de percolation profonde devient le facteur essentiel pour mener à bien ces projets sans porter atteinte à l'environnement. En raison de la nature dynamique de la percolation profonde et de sa gestion, il est employé un système de contrôle également dynamique incorporant un sous-modèle économique et un sous-modèle physique (hydro-salin) en un seul système intégré, comme méthode de solution.

L'étude se base sur un modèle de maximisation de la marge brute régionale, qui prend en considération six activités/cultures différentes, cinq technologies d'irrigation et diverses stratégies de gestion permettant d'épargner la ressource eau et de faire reculer autant que possible la nécessité d'utiliser des systèmes de drainage coûteux et pouvant endommager l'environnement. Les stratégies analysées sont les suivantes: a) mise en place et entretien optimum de systèmes d'arrosage en pluie d'une haute efficacité; b) limite du volume de percolation profonde requise; c) rotation des cultures et d) politiques de réglementation (prix de l'eau d'arrosage, subventions à l'investissement pour l'entretien des machines à arroser, taxes grevant une percolation profonde au-delà de certaines limites critiques prévues, etc.).

Cette analyse peut aider les responsables politiques à choisir les technologies d'irrigation et les politiques de réglementation les plus appropriées, compte tenu que les résultats montrent les contreparties existant entre les marges brutes obtenues dans ces zones et les bénéfices marginaux nets résultant d'une action où l'efficacité de l'irrigation a atteint un niveau maximum, pour les différentes technologies et politiques de réglementation.

SUMMARY

Projects for turning semi-arid land with areas of high salinity and scanty natural drainage into irrigated land require careful appraisal in terms of their economic, physical and environmental impact under future irrigation.

In such problem areas, controlling the volume of deep seeping emerges as the decisive factor in ensuring the sustainability of the project and of the natural environment. In view of the dynamic nature of deep seeping and its management, a dynamic control system is used as a remedial method, this system also featuring an economic submodel and a physical (hydrosaline) submodel all bound into a single integrated system.

The study is based on a regional gross margin maximization model taking in six different activities/crops, five irrigation technologies and various water-saving management strategies aimed at warding off as far as possible the need for costly and environmentally questionable drainage systems. The strategies reviewed are: a) the installation and optimum maintenance of high-efficiency overhead irrigation systems; b) limiting the volume of deep seeping arising; c) crop rotations and d) regulation policies (the pricing of irrigation water, subsidies for investment in irrigation machinery maintenance, taxes penalizing deep seeping in excess of a pre-established critical level, etc.).

This analysis may assist policy-makers concerned in selecting the most suitable drainage technologies and regulation policies, since the results show the relative gains between the gross margin obtained in these areas and the gross marginal returns from operating at maximum drainage efficiency levels for each of the various technologies and regulating policies.
