

Simulación del Regadío Flumen-Monegros*

^aCalvo Calzada Elena, ^aFeijóo Bello M.Luisa, ^bAlbiac Murillo José,
^cMithat Mema, ^bMestre Sanchis Fernando y ^bTapia Barcones Javier

^a Departamento de Análisis Económico, Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales.
 Universidad de Zaragoza. Gran Vía 2, 50015, Zaragoza (España)

^b Unidad de Economía Agraria, Servicio de Investigación Agroalimentaria,
 Diputación General de Aragón
 Apartado 727, 50080, Zaragoza (España).

^c Departamento de Economía. Ministerio de Agricultura y Alimentación.
 Bulevardi Deshmoret e Kombit, 4. Tirana (Albania)

RESUMEN

Este artículo describe un modelo del regadío Flumen-Monegros (Aragón) y los resultados de simulación de este modelo bajo distintos escenarios. El modelo incorpora información agronómica, económica y de política agraria, mediante técnicas de programación lineal y de simulación de cultivos. La función objetivo maximiza el margen neto de los cultivos. Los cultivos que se introducen en el modelo son los más importantes de la zona. Una característica importante del modelo es la clasificación de la superficie de cultivo en distintos tipos de suelos según su capacidad productiva, lo que permite discriminar los cultivos más rentables en cada tipo de suelo en función de los recursos disponibles.

En la validación del modelo se ha comprobado que los resultados de superficies que se obtienen con el modelo son muy parecidos a los observados en la realidad. El modelo se ha construido para caracterizar el comportamiento del regadío de la zona ante distintos escenarios: eliminación de los pagos directos, incremento del precio del agua, y reducción del abonado. En el escenario de reducción del abonado se examina el coste que supone la reducción de la contaminación por nitrógeno.

Palabras Clave: Uso de la tierra, Regadío, Modelización, Simulación.

* El artículo presenta resultados de investigación del proyecto SC97-025-C2-2 del INIA.

1 INTRODUCCIÓN

Las propuestas de la Agenda 2000 y los acuerdos del GATT suponen la progresiva liberalización de los mercados agrarios, el cuestionamiento de las ayudas a la agricultura, y la introducción de requisitos medioambientales cada vez más estrictos. Estos cambios van a tener un fuerte impacto sobre el uso de los recursos naturales, por lo que son necesarios análisis del uso de la tierra y el agua, que contribuyan al diseño y evaluación de medidas de política agraria y medioambiental. Estos estudios requieren una combinación de modelos de simulación, sistemas de información geográfica, bases de datos y técnicas de optimización (Koning et al., 1992; Fresco et al., 1994; Jakeman et al., 1995). El análisis de los recursos agua y tierra tiene componentes agronómicos, ecológicos, medioambientales, económicos y sociales, que tienen un gran interés para los distintos agentes del sector agrario, de la administración y de la sociedad en general (Carlson, 1993).

En este trabajo se analiza el sistema de regadío Flumen-Monegros en la provincia de Huesca, cuya agricultura de regadío es un elemento fundamental para la actividad económica y la estabilidad demográfica. El sistema de regadío se estudia mediante un modelo que maximiza el margen neto obtenido con las distintas actividades de cultivo de la zona. El área de estudio comprende dieciséis municipios de las comarcas de Hoya de Huesca y Monegros. La zona ocupa 85.510 hectáreas, de las que 61.800 son cultivables y 44.858 son tierras en regadío. El clima es de tipo semiárido con déficit de agua a lo largo de todo el año, situación que se agrava en la comarca de Monegros, por lo que el riego es esencial en la producción agrícola. El origen de los recursos hídricos del área de estudio es el pantano de la Sotonera, con una capacidad de 187 Hm³.

El suelo se ha clasificado en cuatro tipos a partir de la información facilitada por Nogués (1994). En el cuadro 1 muestran la características de estos suelos. La superficie afectada por salinidad o sodicidad cubre unas 13.200 hectáreas, y el suelo de tipo AG3 es el más amenazado por la salinidad (Herrero y Aragües, 1988). Debido a las características del suelo, ya que el método de riego es por superficie, la eficiencia de riego se estima en un 40 por ciento para el tipo de suelo AG1, 60 por ciento para el tipo AG2, y 80 por ciento para el tipo AG3. Estas eficiencias se han utilizado para calcular el agua de riego que cubre las necesidades netas de los cultivos.

Cuadro 1: Agrupación de los suelos

Tipo	Subtipo	Productividad	C-Eléctrica	Sodicidad	pH	CRAD
AG1	Regadío	Alta	2,5	2	8,2	1.730
AG2	Regadío	Media	8	13	8,7	2.043
AG3	Regadío	Baja	12	14	8,8	2.680
AG4	Secano	Alta	2,8	3	8,2	1.350

Fuente: Nogués (1994)

Los principales cultivos de la zona son los cereales de invierno (trigo y cebada), el maíz, el girasol, el arroz, y la alfalfa. Estos cultivos son los que se han considerado en el modelo. Las superficies de cultivo de los municipios se han obtenido de los cuestionarios base (1T) para la elaboración de los Anuarios de Estadística Agraria del Ministerio de Agricultura, y de las estimaciones de superficie de cultivo mediante teledetección y encuestas de campo (Herrero y Casterad, 1996).

2 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

El modelo tiene dos componentes, un componente de programación lineal y un componente de crecimiento de cultivos. El programa lineal puede representarse de la siguiente forma:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Max } z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \\ \text{s.a. } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_j \quad \forall i = 1, \dots, m \\ x_j \geq 0 \end{array} \right\} \quad (1)$$

La principal ventaja de utilizar la programación lineal es disponer de un método relativamente sencillo, ya que la información técnica y económica requerida es menos compleja que en otros métodos de programación matemática como la programación no lineal o la programación dinámica. Ahora bien, los resultados del programa dependen de la estimación de los coeficientes que intervienen en (1) y de la hipótesis de linealidad de la función objetivo y de las restricciones. La programación lineal también tiene limitaciones para incluir aspectos dinámicos y de incertidumbre. Existen distintas aplicaciones que se han desarrollado en España para analizar la producción agraria, aplicando técnicas de programación lineal.¹

¹ Ver los trabajos de Alaejos (1993), Alarcón (1994), Arias (1994), Berbel (1998), Gómez (1995), Juárez (1996), López (1998) y Millán (1995).

El componente de crecimiento de cultivos se ha empleado en la estimación de los coeficientes de rendimiento de actividades de cultivo y en la simulación de escenarios. Se ha utilizado el paquete de simulación de cultivos DSSAT, especificado para diversos cultivos. El paquete DSSAT es un conjunto de programas informáticos integrados en un único paquete que permite la simulación de cultivos tanto en investigaciones técnicas como en la toma de decisiones. El paquete permite a los usuarios combinar los requerimientos biológicos de los cultivos con las características físicas del suelo, de forma que se obtiene información sobre el crecimiento de los cultivos.

El DSSAT esta integrado por: i) un sistema de manejo de base de datos para introducir, almacenar y extraer un mínimo de datos necesario para llevar a cabo las simulaciones; ii) un conjunto de modelos de cultivos validados en las interacciones de genotipo ambiente; y iii) un programa de aplicaciones que permite analizar y mostrar los resultados de las simulaciones efectuadas. Los rendimientos de los cultivos utilizados en este trabajo se han calculado con el programa de simulación de cultivos CERES incorporado en DSSAT. Los rendimientos se han simulado a partir de datos de suelo, clima de la zona, datos genéticos de las variedades, y tipo de manejo de los cultivos en la zona.

En el problema de optimización, la función objetivo maximiza el margen neto de las actividades de cultivo, y las restricciones representan la disponibilidad de recursos, las condiciones agronómicas, y la política agraria. Las actividades de cultivo consideradas en secano son trigo y cebada, y en regadío maíz, girasol, alfalfa y arroz. Los datos de costes proceden de publicaciones oficiales y se agrupan en costes directos, maquinaria, mano de obra, costes indirectos y amortizaciones. Otros coeficientes se han estimado a partir de fuentes estadísticas oficiales y de datos de teledetección facilitados por la Unidad de Suelos y Riegos (SIA-DGA).

La disponibilidad de recursos se introduce mediante restricciones que expresan las limitaciones de utilización de los recursos tierra, agua y mano de obra. Las condiciones agronómicas más importantes que requieren los cultivos se han introducido en el modelo mediante restricciones de sucesión y frecuencia. Las restricciones de política agraria son las de retirada de tierras y barbecho en secano.

El modelo incluye 26 actividades y 19 variables adicionales, y está formado por una función objetivo y 86 ecuaciones e inecuaciones que representan las restricciones. Las doce primeras restricciones son de ocupación de superficie. Las ecuaciones 13 a 27 determinan las relaciones de sucesión de los cultivos en regadío. La ecuación 28 establece la relación de sucesión en secano. Las ecuaciones 29 a 43 recogen las restricciones de frecuencia. Las ecuaciones 44 a 46 incorporan los requisitos de la

Política Agraria Común. Las ecuaciones 47 a 86 representan las restricciones de los recursos agua y mano de obra. En Mithat et al. (1998) se explica en detalle la construcción del modelo y los datos utilizados.

3 VALIDACIÓN Y SIMULACIÓN

El modelo se ha aplicado a los dieciséis municipios del área de estudio para las campañas 94 y 96. Para validar el modelo, se han comparado los resultados del programa lineal con la información estadística y de teledetección. La validación del modelo se ha realizado comparando la solución del modelo con los datos reales, examinando las superficies de cultivo, el consumo de agua y el margen neto. La superficie de cada cultivo se ha examinado a distintos niveles de agregación geográfica y por tipo de suelo.

Los resultados obtenidos, con el modelo, en cada municipio se aproximan a las superficies base, aunque la aproximación varía por municipios. El cuadro 2 muestra para toda la zona, la asignación de la solución del modelo y los datos reales para los años 1994 y 1996. Los mayores errores relativos se observan en el barbecho, trigo en seco, superficie retirada y suelo no utilizado, aunque estas actividades no tienen una repercusión importante sobre el uso del agua y de la mano de obra. También se aprecia un cierto error relativo en el girasol y el arroz en 1994.

Cuadro 2. Superficie de cultivo en la realidad y según el modelo para 1994 y 1996 (Ha)

	1994				1996			
	Modelo	Plan real	Error	%	Modelo	Plan real	Error	%
Barbecho	2.641	2.212	429	19	3.217	2.658	559	21
Trigo	4.708	4.327	381	9	2.433	2.356	77	3
Trigo seco	733	502	231	46	1.006	784	222	28
Cebada	3.101	3.898	-797	-20	2.128	2.063	65	3
Cebada Seco	5.908	5.421	487	9	4.309	3.742	567	15
Maíz	5.444	5.769	-325	-6	12.972	11.554	1.418	12
Girasol	5.784	4.493	1.291	29	3.130	3.000	130	4
Alfalfa	9.501	11.164	-1.663	-15	7.495	9.154	-1.659	-18
Arroz	5.078	4.065	1.013	25	5.073	5.007	66	1
Retirada PAC	3.330	2.575	755	29	2.887	2.570	317	11
No utilizado	6.488	8.290	-1.802	-22	3.504	5.832	-1.763	-29
Otros cultivos	8.491	8.491	0	0	13.053	13.053	0	0
Total	61.207	61.207	0	0	61.208	61.208	0	0

Aunque las superficies de cultivo de la solución óptima del modelo se aproximan a los datos de la zona en la mayoría de los casos, las diferencias pueden explicarse por las limitaciones del modelo, que no recoge en la función objetivo o en las restricciones criterios importantes de decisión para los agricultores. Además, la agregación de las explotaciones en unidades de término municipal puede explicar algunas diferencias. Las diferencias también pueden deberse tanto a la ineficiencia en la toma de decisiones de los agricultores acostumbrados a implantar una serie de cultivos por inercia, como al coste de adaptación que supone el cambio en las actividades de producción.

Al comparar los resultados obtenidos mediante el modelo con los datos reales, se deduce que el modelo se aproxima bastante a la realidad, en especial en el año 1996. El año 1996 se ha tomado como escenario base para llevar a cabo la simulación.

La simulación ha consistido en analizar la respuesta del modelo ante distintos escenarios, para predecir los efectos de dichos cambios. Los escenarios se han definido modificando alguno de los elementos del modelo: los coeficientes de la función objetivo, la matriz de coeficientes técnicos o los coeficientes del vector de recursos disponibles. El programa de crecimiento de cultivos DSSAT también se utiliza en la simulación. Se han analizado los siguientes escenarios: eliminación de las ayudas directas de la PAC, incremento del precio de agua, y reducción del abonado para limitar la contaminación.

3.1 ESCENARIO DE ELIMINACIÓN DE LAS AYUDAS DIRECTAS DE LA PAC

Tras la Reforma de la PAC y los Acuerdos del GATT, la política agraria en la Unión Europea se orienta a limitar la intervención de mercados para que se reduzcan los precios, y compensar a los agricultores con pagos directos. Aunque esta tendencia se mantiene en la Agenda 2000, es previsible que en el futuro las ayudas directas vayan disminuyendo, y que los agricultores reciban apoyo por el cumplimiento de objetivos medioambientales.

En este apartado se simula la eliminación de las ayudas directas para determinar los efectos que tendría la supresión de las ayudas sobre las actividades de cultivo de la zona. Los márgenes netos de los cultivos se reducen en el importe de las ayudas que han recibido los agricultores en 1996, y desaparecen las restricciones de retirada de tierras.

Bajo este escenario, los resultados confirman la gran influencia de la PAC en el proceso de toma de decisiones de los agricultores. Al eliminar las ayudas directas, la rentabilidad de la actividad agraria (margen neto) cae en un 45 por ciento, y en consecuencia la superficie no utilizada se triplica (Cuadro 3). La eliminación de las ayudas también provoca la expansión del cultivo de cereales en secano, lo que significa que al desaparecer las ayudas se penaliza sobre todo el cultivo en regadío de los productos examinados.

Cuadro 3. Asignación de suelo al eliminar las ayudas de la PAC (Ha).

	Escenario 1	Base	Diferencia
Barbecho	3.246	3.217	29
Trigo	2.228	2.433	-205
Trigo secano	1.063	1.006	57
Cebada	1.863	2.128	-265
Cebada Secano	5.429	4.309	1.120
Maíz	12.983	12.972	11
Girasol	1.325	3.130	-1.805
Alfalfa	4.575	7.495	-2.920
Arroz	6.112	5.073	1.039
PAC	0	2.887	-2.887
No utilizado	9.330	3.504	5.826
Otros cultivos	13.053	13.053	0
Total	61.207	61.207	0

En la tierra en regadío, el cultivo del arroz se expande mientras que disminuye drásticamente el cultivo del girasol y la alfalfa. Los efectos de la eliminación de las ayudas afectan especialmente al suelo de tipo AG2, ya que la superficie no utilizada se multiplica por cinco, mientras que el arroz sustituye al girasol y la alfalfa. A pesar del aumento en la superficie no utilizada, la demanda de agua se mantiene debido a la redistribución de cultivos entre los tipos de suelo.

Ante la eliminación de las ayudas y la pérdida de rentabilidad de los cultivos actuales, los agricultores podrían responder introduciendo en el regadío cultivos de mayor valor añadido como frutales y hortalizas. Ante la previsible reducción progresiva de las ayudas directas, es necesario realizar un esfuerzo de difusión de técnicas de cultivos hortofrutícolas y de apoyo a las inversiones que facilite la adaptación de los agricultores. En este sentido, el Libro Blanco del Agua (Ministerio de Medio Ambiente, 1998) señala que los regadíos con producciones de alto valor añadido deben tener

prioridad sobre otros regadíos con producciones de bajo valor añadido, y la política de la administración puede orientarse en el futuro hacia el apoyo de las zonas de regadío más rentables.

3.2 ESCENARIO DE INCREMENTO DE LOS PRECIOS DEL AGUA

El escenario incremento de los precios del agua es un escenario factible, ya que en la Comisión Europea se ha discutido recientemente sobre el aumento de los precios del agua, y también en la administración española se está debatiendo actualmente sobre la regulación de los mercados del agua y de los precios de este recurso.

El coste del agua de riego que los agricultores están pagando actualmente en la región es aproximadamente 1,3 pta/m³. En el escenario de incremento de los precios del agua, los precios del agua se han incrementado progresivamente hasta las 30 pta/m³. Para llevar a cabo el análisis, se ha incluido en el modelo una ecuación que calcula el agua utilizada por cada asignación, cuyo coste se introduce en la función objetivo.

Los resultados de simulación muestran que la demanda de agua es inelástica hasta que el precio alcanza las 10 pta/m³, y no cambia ni el plan de cultivos ni la demanda de agua. A partir de este precio, la demanda de agua respecto al precio se vuelve elástica (Cuadro 4 y Figura 2).

Cuadro 4. Asignación de suelo al incrementar el precio del agua (Ha)

[illegible]

Los cultivos más sensibles al precio del agua son la alfalfa y el girasol, que se dejan de cultivar cuando el precio del agua supera las 10 pta/m³. El arroz y el maíz dejan de cultivarse cuando el precio del agua supera las 20 pta/m³. Los cereales de invierno (trigo y cebada) mantienen su superficie, y se expanden cuando el precio del agua supera las 20 pta/m³ debido a su baja necesidad de agua. La superficie cultivada en secano aumenta conforme lo hace la mano de obra disponible.

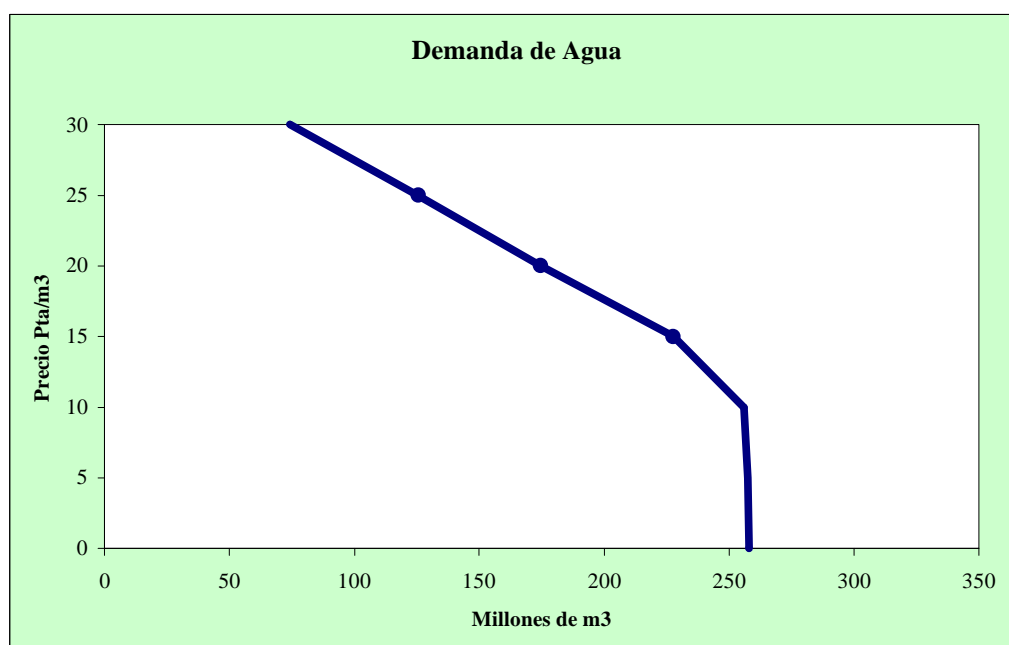


Figura 2. Demanda de agua en el sistema Flumen-Monegros

La superficie cultivada en regadío desciende a la mitad conforme aumenta el precio del agua, pasando de 40.000 a 20.000 Ha. Este descenso es más pronunciado a partir de las 15 pta/m³. El margen neto es positivo hasta que el agua alcanza las 25 pta/m³, y para precios más elevados el margen es negativo.

Ante una política de precios del agua elevados, los agricultores pueden verse obligados a introducir cultivos más intensivos en tecnología de riego, capital y mano de obra que puedan soportar costes de agua elevados, como ocurre en el levante mediterráneo.

3.3 ESCENARIO DE REDUCCIÓN DEL ABONADO

La utilización de abono en las actividades de cultivo genera compuestos nitrogenados que contaminan los suelos, los acuíferos y las aguas superficiales. Esta

contaminación por nitratos reduce la calidad de las aguas, y tiene un impacto medioambiental significativo. El análisis de la contaminación por nitratos es relevante, ya que las políticas comunitarias medioambientales van a ser cada vez más estrictas.

En la zona de regadío de Monegros, las cantidades de abono que se aplican son fruto de la experiencia de los agricultores y de las recomendaciones de los expertos que les asesoran. Mediciones realizadas por expertos en áreas de regadío limítrofes con la zona de estudio (Almudevar) indican que la cantidad de nitrógeno que se pierde es del orden de 50 a 70 kilogramos de nitrógeno activo por hectárea (Isidoro, 1997). Este nitrógeno contamina los suelos, los acuíferos y las aguas superficiales.

El escenario reducción de abonado plantea una reducción en la utilización de abonos del 50 por ciento sobre el escenario base. Esta reducción sería consecuencia del establecimiento por las autoridades medioambientales de un límite en la cantidad de abonado en las actividades de cultivo, para disminuir la contaminación de compuestos nitrogenados. Existen una serie de esquemas alternativos para reducir la contaminación como impuestos, permisos negociables y otras medidas que no se consideran en este análisis.

Cuadro 5. Rendimiento de los cultivos bajo los escenarios base y reducción del abonado

	Trigo				Cebada				Maíz		
	AG1	AG2	AG3	AG4	AG1	AG2	AG3	AG4	AG1	AG2	AG3
Base	6.44	5.28	4.57	4.78	6.34	5.46	4.97	4.18	12.6	10.10	8.81
Reducción	5.77	3.80	4.05	2.44	4.89	3.67	3.78	3.40	8.95	6.20	6.65

El abonado está directamente relacionado con los rendimientos obtenidos, y la simulación de la respuesta de los cultivos a la cantidad de fertilizante se ha hecho utilizando el programa de simulación de cultivos DSSAT. Con este programa se han calculado los rendimientos que se obtienen al reducir la cantidad de fertilizante en un 50 por ciento de la cantidad utilizada en el escenario base. En el programa DSSAT sólo se han definido los modelos de simulación de cultivos para el trigo, la cebada y el maíz. Por esta razón se ha supuesto que para la alfalfa, el girasol y el arroz, la disminución del abonado en un 50 por ciento reduce los rendimientos en un 25 por ciento.

Los rendimientos calculados con el DSSAT para el trigo, la cebada y el maíz bajo el escenario de reducción de abonado se presentan en el cuadro 5. Estos rendimientos se han utilizado para recalcular los coeficientes de margen neto de la función objetivo.

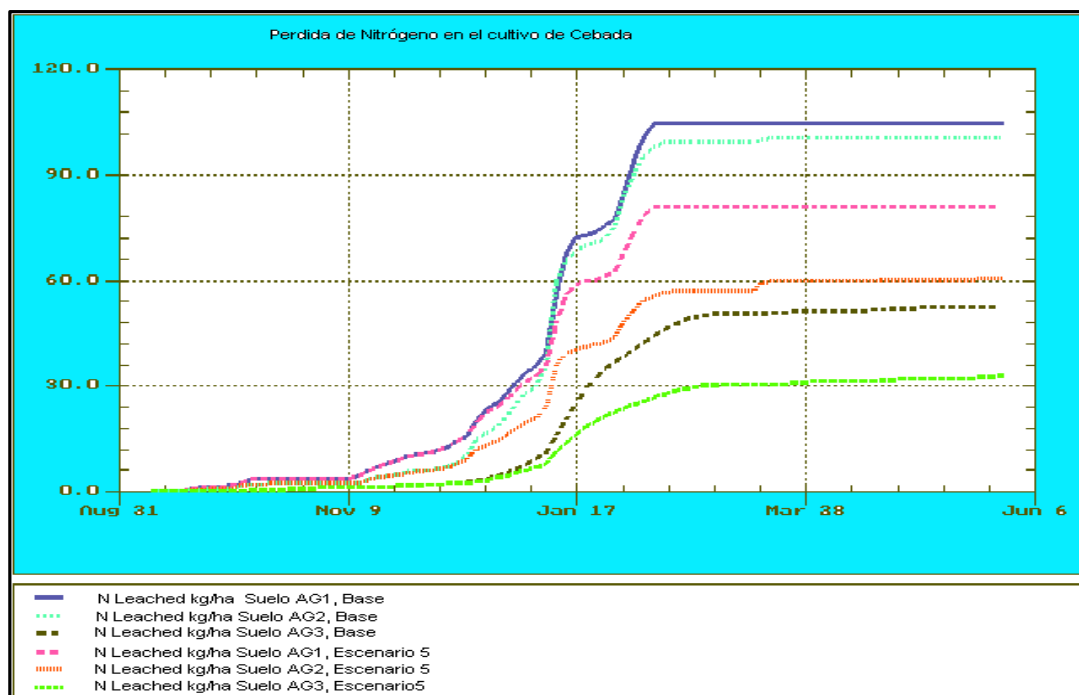


Figura 3. Pérdida de nitrógeno en el cultivo de la Cebada

Cuadro 6. Pérdida de nitrógeno activo por tipo de cultivo y suelo (Kg/Ha)

	Año base			Escenario 3		
	AG1	AG2	AG3	AG1	AG2	AG3
Trigo	105	110	63	80	58	43
Cebada	105	102	53	80	60	33
Maíz	47	37	42	27	30	23

Fuente Elaboración propia a partir de DSSAT3

En la simulación de los cultivos, el programa DSSAT estima la cantidad de nitrógeno activo que se pierde a lo largo de la vida del cultivo. La figura 3 muestra para la cebada, la cantidad de nitrógeno que se pierde durante el ciclo de cultivo bajo el tratamiento de abono del escenario base y bajo el escenario de reducción en un 50 por ciento del fertilizante.

El cuadro 6 ilustra la cantidad de nitrógeno activo que se pierde por tipo de suelo bajo el escenario base y el escenario de reducción de abonado. Una vez estimadas las pérdidas de la alfalfa, el girasol y el arroz, se concluye que la pérdida total de nitrógeno activo es de unos 67 Kg/Ha al año bajo el escenario base. Este nitrógeno es el que contamina en la zona los suelos y las aguas superficiales y subterráneas. Bajo el escenario de reducción del abonado a la mitad, la cantidad de

nitrógeno que se pierde es de unos 45 Kg/Ha al año.² Por lo tanto, la contaminación que finalmente alcanza los suelos, acuíferos y aguas superficiales disminuye aproximadamente en unos 22 Kg/Ha de nitrógeno activo.

El cuadro 7 muestra los resultados de asignación de suelo al reducir el abono y caer los rendimientos. Los cultivos más favorecidos bajo este escenario son los cereales de invierno en regadío y en especial el girasol, que incrementa su superficie en un 45 por ciento. Los cereales de invierno en secano son los más afectados por la reducción del abono, ya que la reducción del abonado tiene un efecto mayor en el rendimiento de estos cultivos que en los cereales de invierno en regadío.

La disminución del rendimiento de los cultivos por la reducción del abonado, provoca una caída en el margen neto desde 90.600 pta/Ha bajo el escenario base a 54.400 pta/Ha, lo que supone una pérdida de 36.200 pta/Ha (40%). La reducción de la contaminación en toda la zona Flumen-Monegros es de 1.096 toneladas de nitrógeno activo, con unas pérdidas para los agricultores de unos 1.500 millones de pesetas de margen neto. Estas pérdidas representan un coste de oportunidad de 1.370 pesetas por kilogramo de nitrógeno activo. La caída en el margen por hectárea es 36.200 pta/Ha, y esta cantidad es también una medida de la compensación que deberían recibir los agricultores para implementar la reducción del abonado. El importe de esta compensación es similar a los pagos directos que los agricultores están recibiendo actualmente.

Cuadro 7. Asignación de suelo al reducir el abonado (Ha)

	Escenario 3	Base	Diferencia
Barbecho	2.945	3.217	-272
Trigo	2.697	2.433	264
Trigo secano	772	1.006	-234
Cebada	2.198	2.128	70
Cebada Secano	4.252	4.309	-57
Maíz	12.707	12.972	-265
Girasol	4.525	3.130	1.395
Alfalfa	7.139	7.495	-356
Arroz	4.349	5.073	-724
PAC	3.017	2.887	130
No utilizado	3.553	3.504	49
Otros cultivos	13.053	13.053	0
Total	61.207	61.207	0

Fuente: Elaboración propia

² Al disminuir el abonado, la proporción de pérdida de nitrógeno sobre nitrógeno abonado aumenta, debido a que el tamaño de la raíz es menor.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha construido un modelo que representa las actividades de cultivo del regadío de Flumen-Monegros. El propósito es examinar el impacto sobre las actividades de cultivo de cambios en las variables económicas, de política agraria, y de disponibilidad de recursos. El modelo incorpora técnicas de programación lineal y técnicas de simulación de crecimiento de cultivos. En la optimización se maximiza el margen neto de las actividades de cultivo, lo que se consigue implantando en cada suelo el cultivo más rentable que cumple las restricciones. La validación del modelo se ha llevado a cabo comparando la solución óptima con la superficie real de cultivo en los dieciséis municipios del área de estudio.

El modelo se ha simulado bajo tres escenarios: eliminación de los pagos directos a los agricultores, aumentos en el precio del agua, y reducción del abonado para mitigar la contaminación por nitrógeno. La eliminación de los pagos directos de la PAC tiene una gran influencia sobre las decisiones de producción: el margen neto cae en un 45 por ciento y se triplica la superficie no utilizada. La supresión de las ayudas directas provoca una reducción del cultivo en regadío, mientras que se expande el cultivo en secano, lo que significa que la eliminación de los pagos directos penaliza sobre todo a los cultivos en regadío que se producen actualmente en la zona. La respuesta de los agricultores ante este escenario puede ser la introducción en el regadío de producciones de mayor valor añadido, como frutas y hortalizas. Pero esta transformación exige un esfuerzo de diseminación de información sobre técnicas de cultivo hortofrutícolas, y el apoyo de las inversiones necesarias en nuevos sistemas de riego y en maquinaria.

Los agricultores pueden soportar subidas importantes del precio del agua por encima de las 1,3 pta/m³ que pagan actualmente, pero su margen neto desaparece cuando el precio del agua alcanza las 25 pta/m³. Un precio del agua de hasta 10 pta/m³ no afecta a la utilización del agua, pero subidas de precio superiores provocan una drástica caída en la demanda de agua, al abandonarse todos los cultivos excepto los cereales de invierno. Una política de aumento del precio del agua podría forzar a los agricultores a introducir cultivos más intensivos en tecnología de riego, capital y trabajo. Estos cultivos intensivos pueden sostener unos costes de agua elevados como ocurre en el levante mediterráneo.

Los resultados del escenario de reducción del abonado, muestran que los cambios en la asignación de los cultivos son moderados. La superficie del girasol y de los cereales de invierno en regadío aumenta, mientras que disminuye la superficie del

resto de los cultivos. La principal consecuencia de este escenario es la disminución del margen neto, que experimenta una caída del 40 por ciento. La aplicación de una medida de política medioambiental que limite el abonado a la mitad, reduce la contaminación de nitrógeno desde 3.457 toneladas a 2.326 toneladas de nitrógeno activo, en las 51.600 Ha de tierras de cultivo. Esta reducción de 1.131 toneladas tendría un coste de oportunidad que se estima en 36.200 pta/Ha, cantidad que mide la compensación que los agricultores deberían recibir para incorporar la reducción de fertilizante. Esta cantidad es semejante a los pagos directos que los agricultores están recibiendo actualmente.

El análisis previo muestra que la aplicación de políticas que supongan precios bajos para los cultivos o precios del agua elevados, tendrá un efecto importante sobre el regadío de Flumen-Monegros. Los agricultores pueden responder con una reducción de las actividades de cultivo y el abandono de tierras, o pueden realizar inversiones para introducir producciones de alto valor añadido con un uso intensivo de los factores de producción. Estas producciones potenciarían el desarrollo económico de la zona, exigiendo a los agricultores un gran esfuerzo en inversiones y organización, pero con unos efectos medioambientales que probablemente serían negativos.

Para determinar los costes y beneficios de cada alternativa, se necesita más información sobre los costes de mantenimiento y mejora del sistema de riego, la degradación del suelo relacionada con la salinidad y el cultivo del arroz, y el impacto sobre la calidad de las aguas de las producciones de alto valor añadido que utilizan técnicas de cultivo intensivas. La evaluación de los daños totales de contaminación es difícil de medir, pero como muestra el análisis de reducción del nitrógeno, las medidas para evitar la contaminación puede tener un coste elevado.

REFERENCIAS

- Alaejos A. y J. Cañas. 1993. Selección de planes de cultivo en contexto de riesgo mediante el modelo MEDIA-DAP. *Investigación Agraria: Economía* 8:165-181.
- Alarcón S. 1994. Las técnicas multicriterio y su aplicación a la evaluación de planes de desarrollo: El plan Tierra de Campos. *Economía Agraria* 4: 175-217.
- Arias P. 1994. Planificación agraria en contexto de riesgo, mediante los modelos Motad y de Markowitz. Una aplicación a la comarca de La Campiña (Guadalajara). *Investigación Agraria: Economía* 9: 393-409.
- Berbel J., A. Salas y A. Rodríguez. 1998. Repercusiones económicas y sociales de la tarificación del agua de riego. Aplicación a tres zonas regables. Paper presented at the XVI Congreso Nacional de Riego. Palma de Mallorca.
- Carlson G., D. Zilberman y J. Miranowski. 1993. *Agricultural and Environmental Resource Economics*. Oxford University Press. Nueva York.

- Fresco L., J. Stroodnijden, J. Bauma y H. Van Keulen. 1994. *The Future of the Land: Mobilising and Intergrating Knowledge for Land Use Options*. John Wiley & Sons. Nueva York.
- Gómez J. y J. Berbel. 1995. Aplicación de una metodología multicriterio para la estimación de los objetivos de los agricultores del regadío Cordobés. *Investigación Agraria: Economía* 10: 103-123.
- Hazell P. y R. Norton. 1986. *Mathematical Programming for Economic Analysis in Agriculture*. Macmillan. Nueva York.
- Herrero J. y R. Aragüés. 1988. Suelos afectados por salinidad en Aragón. *Surcos de Aragón* 9: 5-10.
- Herrero J. y M. Casterad. 1996. Aforos de cultivos y otras ocupaciones de la zona regable del Flumen en 1996, obtenidos por muestreo. Working document. Unidad de Suelos y Riegos. SIA-DGA. Zaragoza.
- Isidoro D., F. Trifol y D. Quilez. 1997. Nitrógeno exportado por las aguas de drenaje en la Comunidad de Regantes de Almudévar (Monegros I), durante el año hidrológico 1994-1995. Paper presented at the XV Congreso Nacional de Riego. Lérida.
- Jakeman A., B. Beck y J. McAleer 1995. *Modelling Change in Environmental Systems*. John Wiley. Chichester.
- Judez L., J. De Miguel y J. Fuentes. 1996. Una aplicación de la programación lineal para el análisis de los efectos de la PAC sobre las explotaciones cerealistas de la cuenca de Pamplona. *Investigación agraria: Economía* 11: 239-257.
- Koning G. De y Van Diepen C. (1992). Crop production potential of rural areas within the European Communities. Volume IV: Potential, water-limited and actual crop production. Working document W68, Netherlands Scientific Council for Government Policy. La Haya.
- López C., J. Albiac y J. Tapia. 1998. Modelización del uso de la tierra en la zona de regadío del Flumen. Working document 98/6. Unidad de Economía Agraria. SIA-DGA. Zaragoza.
- Millán J. y P. Ruiz. 1995. Determinación de soluciones eficientes en modelos de planificación de cultivos con objetivos públicos y privados en la campaña de Córdoba. *Investigación Agraria: Economía*. 10: 65-76.
- Ministerio de Medio Ambiente. 1998. *Libro Blanco del Agua en España*. Edición preliminar. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- Mithat M., J. Albiac, J. Tapia, M. Feijóo, F. Mestre y E. Calvo. 1998. Modelización de usos de suelo en la zona de Flumen-Monegros. Working document 98/10. Unidad de Economía Agraria. SIA-DGA. Zaragoza.
- Nogués J. 1994. Evaluación de tierras mediante la aplicación del método FAO -1976 y su integración en un sistema de información territorial en las 26000 ha (sectores IV al XI) regadas por el canal del Flumen (Huesca). Proyecto Fin de Carrera. ETSEA. Universidad de Lérida. Lérida.