

# Instrumentos de política de cambio climático en la agricultura de Aragón

MOHAMED TAHER KAHIL (\*)

JOSÉ ALBIAC (\*)

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos decenios se ha observado un cambio rápido del clima que no corresponde con las fluctuaciones naturales. Este cambio climático es consecuencia de las actividades humanas que producen emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera (Wigley 1999, Houghton 2001). Las emisiones GEI se producen por el uso intensivo de energías fósiles en el transporte y la industria, la intensificación de la agricultura que sustituye a la agricultura tradicional de bajo coste medioambiental, y los cambios de uso de la tierra (IPCC 2007).

Varios estudios (Houghton 2001, EEA 2007, IPCC 2007) señalan que el cambio climático causará un aumento de temperaturas, y una disminución de las precipitaciones, con una intensificación de la frecuencia y severidad de los fenómenos extremos de sequías e inundaciones. Estos cambios tendrán impactos negativos sobre la disponibilidad de recursos hídricos, y causarán daños y pérdidas económicas en las actividades agrarias, y en los ecosistemas y su funcionalidad. El informe Stern (Stern 2007) estima que los efectos económicos del cambio climático sin actuación

---

(\*) Unidad de economía agroalimentaria y de los recursos naturales, Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA).

---

- Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros, n.º 233, 2012 (13-42).  
Recibido noviembre 2011. Revisión final aceptada junio 2012.

correctora supondrán una caída anual entre 5 y 20 por cien del producto interior bruto mundial.

La intensificación de la agricultura en décadas recientes es el resultado de las fuertes inversiones en nuevas tecnologías de producción como la mecanización de las actividades agrícolas, la modernización de los sistemas de riego, el uso de fertilizantes y fitosanitarios, y la ganadería intensiva. Estos avances tecnológicos han incrementado la productividad agrícola y ganadera, asegurando una fuente estable y barata de alimentos, unas mayores rentas para los agricultores, y un proceso de desarrollo de las zonas rurales. Sin embargo, la expansión de este tipo de agricultura ha generado impactos medioambientales negativos como las emisiones GEI, la escasez de agua, y la contaminación de los recursos hídricos y de la tierra por nutrientes, pesticidas, y sales. La agricultura se considera responsable del 14 por cien de las emisiones GEI a nivel global (IPCC 2007).

En España, las emisiones GEI del sector agrario alcanzan los 39 millones t CO<sub>2</sub>eq, lo que representa el 10 por cien de las emisiones del país (MARM 2010a) (1). Las emisiones GEI de la agricultura están ligadas a la contaminación por nitratos en el litoral Mediterráneo y en las cuencas del Júcar, Segura, Guadiana, Ebro, y Guadalquivir, con concentraciones de nitratos que pueden alcanzar entre 50 y 100 mg NO<sub>3</sub>/l (Martínez y Albiac 2004).

El cambio climático tendrá efectos considerables sobre la agricultura en España, con diferentes grados de severidad entre las regiones, y posibles reducciones en los rendimientos de los principales cultivos, incrementos en las necesidades de riego, aumento de la sensibilidad de los cultivos ante plagas y enfermedades, y cambios en los usos del suelo (MARM 2005). Además, el cambio climático agudizará los problemas de escasez de agua que ya experimentan varias cuencas españolas, como las del Segura, Sur, Guadalquivir, Júcar, y Guadiana. Se estima que las disponibilidades hídricas se reducirán hasta un 40 por cien y la frecuencia de sequía aumentara hasta diez veces a finales del siglo veintiuno (Lehner 2005, Iglesias 2009).

---

(1) Para expresar las emisiones en t CO<sub>2</sub>eq se utiliza un factor de conversión que es igual a 296 para el óxido nítrico y 23 para el metano (IPCC 2001).

Las cuestiones de mitigación y adaptación al cambio climático han sido introducidas recientemente en las políticas agrícolas e hídricas de la Unión Europea. El objetivo es reducir las emisiones GEI procedentes de fuentes agrícolas y adaptar los recursos hídricos a los impactos proyectados del cambio climático. Estas políticas son principalmente la Política Agrícola Común, la Directiva de Nitratos (CE 1991), la Directiva Marco del Agua (CE 2000), y la Comunicación de la UE sobre escasez y sequía (CE 2007).

La Política Agrícola Común (PAC) es una de las políticas más importantes y uno de los elementos esenciales del sistema institucional de la Unión Europea. En las últimas reformas de la PAC se ha tratado de impulsar la sostenibilidad de la producción agrícola, la conservación de los recursos y la protección de los ecosistemas naturales. Para ello se utilizan mecanismos como las medidas agroambientales, la retirada obligatoria de tierras, las ayudas a la reforestación y los pastos, y el desacoplamiento de las ayudas a la renta de la producción y la ecocondicionalidad. Los principales objetivos de la PAC post 2013 incluyen la mitigación y la adaptación al cambio climático, y la gestión sostenible de los recursos hídricos.

La Directiva de Nitratos tiene por objeto proteger la calidad del agua en Europa evitando que los nitratos procedentes de fuentes agrícolas contaminen las aguas superficiales y subterráneas, y fomentando el uso de buenas prácticas agrarias. El control de la fertilización nitrogenada y la reducción de las pérdidas de nitrógeno en los sistemas agrícolas contribuyen significativamente a la reducción de las emisiones GEI. Además, el uso de las buenas prácticas agrarias como el mínimo laboreo, y la rotación de cultivos tiene efectos positivos sobre el balance de carbono en el suelo. La Directiva Marco del Agua tiene como objetivo alcanzar el buen estado ecológico de las masas de agua, protegiendo los ecosistemas acuáticos y promoviendo el uso sostenible de los recursos hídricos. La Directiva promueve el principio de que los precios del agua deben aproximarse al coste completo de recuperación del recurso. También recomienda el uso de una combinación de límites de emisión y estándares de calidad del agua, y una gestión del agua participativa y basada en la división del territorio en cuencas hidrográficas. La Directiva se considera una herramienta clave para la adaptación de los recursos hídricos al cambio climático.

La escasez de agua y la sequía es una cuestión importante en los países áridos y semiáridos, incluyendo el sur de Europa y la cuenca Mediterránea. Para enfrentar estos problemas, la Unión Europea ha elaborado una Comunicación sobre el desafío de la escasez de agua y la sequía en Europa. La Comunicación propone el establecimiento de un observatorio y un sistema de alerta sobre la sequía a nivel europeo, y la elaboración de planes nacionales de gestión de sequía, aunque la elaboración de estos planes no es obligatorio. La Comunicación también recomienda avanzar hacia la plena aplicación de la Directiva Marco del Agua, la asignación adecuada del agua entre los sectores económicos, y la mejora de la eficiencia del uso de agua.

En la literatura económica, existen numerosos trabajos que analizan los distintos instrumentos de política medioambiental para la mitigación y la adaptación al cambio climático en el sector agrícola. Varios trabajos indican que la inclusión de la agricultura en los sistemas de regulación de GEI permite alcanzar los objetivos de estabilización del clima de manera más coste eficiente, y proporciona oportunidades para reducir el esfuerzo en otros sectores de la economía que tienen costes elevados de reducción de emisiones (De Cara et al. 2005, Ribaud et al. 2011). Sin embargo, el diseño de políticas para reducir las emisiones GEI en el sector agrícola no es una tarea fácil, por el carácter difuso de las emisiones y por los impactos negativos que pueden tener estas políticas sobre la renta de los agricultores y el desarrollo rural (UNFCCC 2008).

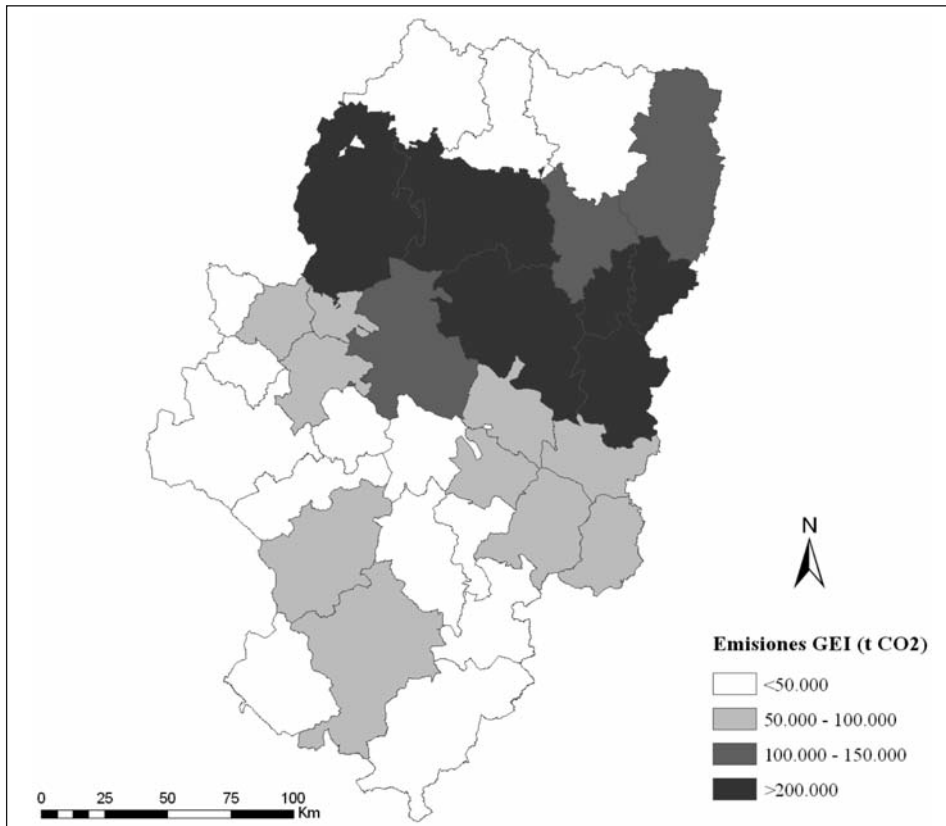
Distintos estudios señalan la importancia de considerar la heterogeneidad regional en cuanto al uso de la tierra, los sistemas de producción, y las prácticas de manejo, porque estos factores determinan la distribución espacial de las emisiones. El conocimiento de la dimensión espacial y de las características locales contribuye a un mejor diseño e implementación de las políticas medioambientales de cambio climático. También surgen dificultades tecnológicas y de viabilidad política en la implementación de medidas de cambio climático en el sector agrícola, en especial con las medidas basadas en instrumentos económicos (Pérez Domínguez et al. 2004, De Cara et al. 2005, Bosello et al. 2007). Las medidas que se consideran más coste-eficientes en el sector agrícola son el desarrollo de instituciones relacionadas con la agricultura y los recursos hídricos para lograr la coo-

peración, los seguros agrarios, las inversiones en infraestructuras de agua, la reducción de producciones intensivas muy contaminantes, la mejora de la eficiencia en el uso de los inputs, las buenas prácticas agrarias, y el secuestro de carbono por los bosques, la vegetación leñosa y los suelos agrícolas. Sin embargo, estas medidas requieren el diseño de incentivos adecuados para ser implementadas por los grupos de interés (Hediger 2006, Schneider et al. 2007, Martín-Ortega 2011).

En este trabajo se realiza una estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero y de las emisiones de lixiviado de nitrógeno procedentes del sector agrario en Aragón. El objetivo es aportar información adicional sobre la distribución espacial de las emisiones contaminantes

Figura 1

EMISIONES GEI POR COMARCA EN ARAGÓN (t CO<sub>2</sub> eq/año)



que complementa los inventarios nacionales y regionales existentes (MARM 2010a, EACCEL 2011). También se examinan los impactos medioambientales y económicos de distintas medidas de mitigación de las emisiones generadas por las actividades de cultivo, y de medidas de adaptación de los recursos hídricos al cambio climático. El objetivo es analizar la contribución de las políticas agrícolas e hídricas europeas a la adaptación y la mitigación del cambio climático.

## 2. ESTIMACION DE LA CARGA DE EMISIONES

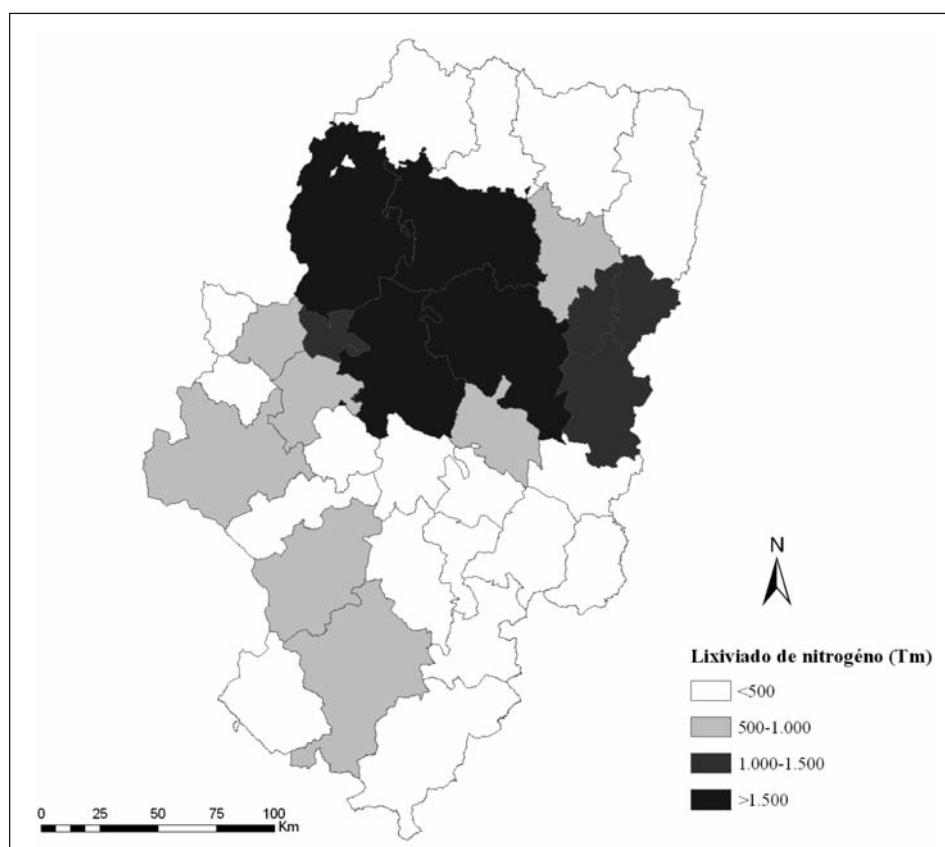
La metodología empleada para estimar las emisiones GEI es una combinación entre los métodos utilizados por la Agencia Europea de Medioambiente (EEA 2006) y los utilizados por el IPCC (1996a). Estos métodos se basan en la utilización de los factores de emisión por unidad de actividad, y la información de producción regional (De Cara et al. 2005, Schneider et al. 2007). Para mejorar los resultados y aumentar su grado de exactitud, se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica sobre los factores de emisión específicos para España y para Aragón, y se ha consultado la opinión de expertos para contrastar y mejorar los datos de producción. Las emisiones de lixiviado de nitrógeno se han estimado a partir de los trabajos empíricos realizados en la cuenca del Ebro (Isidoro 1999, Cavero et al. 2003, Causapé et al. 2004, Mema 2006).

Según las estimaciones realizadas, las emisiones GEI del sector agrario en Aragón se acercan a los 3,5 millones t CO<sub>2</sub>eq, lo que representa el 20 por cien de las emisiones totales de la región, y duplican en porcentaje a la contribución del sector a las emisiones totales de España. Las principales emisiones GEI de origen agrario, provienen de las emisiones de metano (CH<sub>4</sub>) y de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) del manejo de estiércol y de la fermentación entérica, y alcanzan los 2,5 millones t CO<sub>2</sub>eq. En segundo lugar están las emisiones de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) de los fertilizantes nitrogenados que alcanzan 1 millón t CO<sub>2</sub>eq, de las que un 70 por cien son emisiones directas de los suelos agrícolas durante los procesos microbianos de nitrificación y desnitrificación, y un 30 por cien son emisiones indirectas de las pérdidas de nitrógeno por lixiviación y escorrentía que alcanzan 23.000 t N-NO<sub>3</sub>. La principal fuente de emisiones son los cul-

tivos herbáceos en regadío. Las comarcas de Aragón con mayor carga de emisiones son Bajo Cinca, Cinca Medio, Cinco Villas, La Litera y Monegros, donde se localizan los cultivos intensivos de regadío (maíz, arroz, melocotón) y donde también se concentran las cabañas de porcino y vacuno (Figuras 1 y 2).

Figura 2

### EMISIONES DE LIXIVIADO DE NITRÓGENO POR COMARCA EN ARAGÓN (t N-NO<sub>3</sub>)



## 1. MODELO DE ANÁLISIS

El estudio examina las políticas de mitigación de las emisiones GEI y de lixiviado de nitrógeno generadas por las actividades de cultivo, y también

las políticas de adaptación de los recursos hídricos al cambio climático en Aragón. El trabajo analiza las actividades de cultivo en Aragón, que se localizan en el valle medio del Ebro. Los principales cultivos son olivo, viñedo, almendro y melocotonero en cultivos leñosos, y alfalfa, maíz, arroz, cebada y trigo en cultivos herbáceos (Cuadro 1).

Cuadro 1

## SUPERFICIE DE CULTIVOS EN ARAGÓN (HA, 2008)

Cultivo	Secano	Regadío	Total	Porcentaje
Arroz	0	10.000	10.000	1
Cebada	376.600	91.800	468.400	39
Trigo	217.600	58.300	275.900	23
Maíz	0	58.000	58.000	5
Otros cereales	38.400	2.900	41.300	4
<b>Cereales</b>	<b>632.600</b>	<b>221.000</b>	<b>853.600</b>	<b>72</b>
Alfalfa	16.500	68.000	84.500	7
Otros cultivos forrajeros	23.000	16.200	39.200	3
<b>Forrajeros</b>	<b>39.500</b>	<b>84.200</b>	<b>123.700</b>	<b>10</b>
Melocotonero	400	11.900	12.300	1
Almendro	64.400	5.600	70.000	6
Olivo	36.700	11.200	47.900	4
Viñedo	35.000	10.400	45.400	4
Otros leñosos	3.900	21.500	25.400	2
<b>Leñosos</b>	<b>140.400</b>	<b>60.600</b>	<b>201.000</b>	<b>17</b>
<b>Hortalizas</b>	<b>200</b>	<b>9.700</b>	<b>9.900</b>	<b>1</b>
<b>Total</b>	<b>812.700</b>	<b>375.500</b>	<b>1.188.200</b>	<b>100</b>

Fuente: Gobierno de Aragón (2010).

El análisis se basa en un modelo bioeconómico regional que incluye las principales actividades de cultivo en secano y regadío. El modelo incluye un número elevado de actividades en un extenso ámbito espacial, por lo que se ha utilizado el procedimiento de programación lineal en la mode-



lización. Beneke y Winterboer (1984) señalan que la programación lineal es un método adecuado para analizar problemas de asignación de recursos naturales y simular políticas agrarias y medioambientales. La razón es que permite introducir una gran cantidad de información técnica y económica con un nivel de desagregación apropiado, para poder representar y analizar el gran número de escenarios alternativos existentes. El modelo de programación lineal simula los escenarios de políticas de mitigación y adaptación al cambio climático, y estos escenarios se definen fijando los correspondientes valores de los parámetros del modelo.

El modelo maximiza el bienestar social de las actividades de cultivo, que es la suma del beneficio privado y del valor social de las externalidades de estas actividades de cultivo. En el modelo se utiliza una tecnología de producción Leontief, y se supone que los precios de producción son exógenos (2). El problema de optimización viene dado por las expresiones:

$$\text{Max}_{X_i} \sum_{i=1}^{26} [C_i - (v \cdot E_i + \mu \cdot L_i)] X_i$$

Sujeto a:

$$\sum_i X_i \leq d_s \quad [1]$$

$$\sum_{i=1}^{21} W_{mi} \cdot X_i \leq d_{wm} ; \sum_{m=1}^{12} d_{wm} \leq D_{wT} \quad [2]$$

$$\sum_{i=1}^{26} O_{mi} \cdot X_i \leq d_{om} ; \sum_{m=1}^{12} d_{om} \leq D_{oT} \quad [3]$$

$$X_i = \sum_{n=1}^5 \alpha_n \cdot X_{in} ; \sum_{n=1}^5 \alpha_n = 1 ; \alpha_n \geq 0 \quad [4]$$

$$X_i \geq 0 ; i = 1, \dots, 26$$

---

(2) La función de producción de Leontief es una función de producción en la que los factores se utilizan en proporciones fijas, de manera que no hay sustitución entre los factores. La función viene dada por  $y = \text{Min}((x1/a), (x2/b))$ , donde  $y$  es la cantidad producida,  $x1$  y  $x2$  son las cantidades de factores de producción 1 y 2, y los coeficientes  $a$  y  $b$  son constantes (Varian 1998).

La función objetivo representa el bienestar social y tiene dos componentes; el primer componente es la renta neta de los agricultores, y el segundo componente es el daño medioambiental de las emisiones GEI y del lixiviado de nitrógeno. Esta función representa el problema del decisor social, al incluir los beneficios y costes privados de los agricultores, y los costes sociales de las emisiones contaminantes que generan las actividades de producción (Perman et al. 2003, Koundouri y Christou 2006, Esteban y Albiac 2011).

La renta neta de los agricultores es igual al margen neto por hectárea de cada cultivo  $i$  ( $i=1, \dots, 26$ ) por la superficie cultivada  $X_i$ . Los márgenes netos de los cultivos se han calculado utilizando información de las publicaciones del Ministerio de Medio Ambiente sobre resultados técnico-económicos de las explotaciones agrícolas en Aragón (MARM 2009). Los precios de los cultivos se definen como la media de precios de los últimos cinco años, y los precios de los inputs agua y nitrógeno son  $0,05 \text{ €/m}^3$  y  $1 \text{ €/kg N}$ , respectivamente (Kahil 2011). El daño medioambiental por hectárea es la suma del coste de las emisiones GEI ( $v.E_i$ ) y del coste de las emisiones de lixiviado de nitrógeno ( $\mu.L_i$ ), donde  $v$  y  $\mu$  son los costes unitarios de emisiones GEI y de lixiviado, respectivamente.

La información sobre los costes de daño de las emisiones GEI es muy escasa en la literatura, y las estimaciones disponibles no incluyen todos los daños. El cuarto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC 2007) señala que el coste social del carbono o los costes de los daños del cambio climático para el conjunto del planeta en 2005 son de unos  $10 \text{ €/t CO}_2\text{eq}$ , con un rango de estimaciones entre  $2,5$  y  $80 \text{ €/t CO}_2\text{eq}$ . Watkiss et al. (2005) estiman un rango entre  $15$  y  $80 \text{ €/t CO}_2\text{eq}$ , con un rango medio entre  $20$  y  $25 \text{ €/t CO}_2\text{eq}$ . Tol (2004) hace una revisión de distintos trabajos y concluye que el coste marginal de daño del  $\text{CO}_2$  supera los  $14 \text{ €/t CO}_2\text{eq}$ .

Ante la falta de información completa y detallada sobre los costes de las emisiones GEI y de las emisiones de lixiviado de nitrógeno, en este trabajo se asume una función de daño lineal. El coste unitario de las emisiones GEI se define como el precio de los derechos de emisión de  $\text{CO}_2$  en el mercado internacional ( $22 \text{ €/t CO}_2\text{eq}$ ), mientras que el coste unitario de las emisiones de lixiviado de nitrógeno se define como el coste de eli-

minación del nitrógeno del agua (1,3 €/kg N-NO<sub>3</sub>) (Martínez y Albiac 2006, MARM 2010b).

Las restricciones de suelo [1] representan la superficie total disponible  $d_s$  para los grupos de cultivos herbáceos y leñosos, en secano y regadío. Para establecer estas restricciones, se utiliza la información sobre la superficie ocupada por cada cultivo en cada término municipal (Gobierno de Aragón 2009). En los cultivos en regadío se distingue entre superficies con riego por inundación, aspersión y goteo.

Las restricciones de agua [2] determinan la cantidad de agua disponible mensualmente  $d_{wm}$  y anualmente  $D_{wT}$ , mientras que  $W_{mi}$  son los coeficientes de necesidades de agua de riego mensual de cada cultivo  $i$  ( $i=1, \dots, 21$ ). Las disponibilidades de agua se calculan multiplicando las necesidades de agua de cada cultivo por la superficie ocupada. La necesidad de agua de riego del cultivo es igual a la necesidad hídrica neta dividida por la eficiencia del sistema de riego (0,6 inundación, 0,75 aspersión, y 0,9 goteo). La necesidad hídrica neta es igual a la evapotranspiración del cultivo menos la precipitación, y la evapotranspiración del cultivo se obtiene aplicando los coeficientes de cultivo  $K_c$  a la evapotranspiración de referencia. La evapotranspiración de referencia se calcula con los datos meteorológicos comarcales procedentes de la red SIAR (3). Para estimar estas variables se utiliza el procedimiento de Martínez Cob et al. (1998) basado en el método de Hargreaves.

En las restricciones de mano de obra [3],  $O_{mi}$  representa los coeficientes de necesidades de mano de obra mensual de cada cultivo  $i$ , y  $d_{om}$  y  $D_{oT}$  representan las disponibilidades de mano de obra mensual y anual, respectivamente. La disponibilidad de mano de obra se ha calculado a partir de la información de costes proporcionada por el Ministerio de Medio Ambiente (MARM 2009).

Las restricciones de agregación [4] expresan que el vector de producciones  $X_i$  es combinación lineal convexa de los vectores de producciones históricas observadas en los últimos años  $X_{in}$  (Gobierno de Aragón 2009

---

(3) La red SIAR es un servicio de asesoramiento a los regantes, e incluye una red de estaciones meteorológicas que proporciona datos climáticos diarios y predicciones meteorológicas en las diferentes comarcas de Aragón (<http://servicios.aragon.es/oresa/>).

y 2010). Los parámetros  $\alpha_n$  son los coeficientes de la combinación lineal convexa y se obtienen durante el proceso de optimización (4).

El modelo se emplea para simular los efectos de distintas medidas de mitigación y adaptación al cambio climático, y sus impactos sobre el bienestar social, el daño medioambiental, la renta de los agricultores, el uso de factores de producción, las emisiones contaminantes, y la superficie cultivada.

En el modelo se introduce información biofísica y económica específica para cada comarca de Aragón: uso de inputs agua, nitrógeno y mano de obra; distribución de superficies por sistemas de riego; emisiones de óxido nítrico ( $N_2O$ ) y emisiones de lixiviado de nitrógeno; costes de producción y márgenes netos de cultivos; y series históricas de producción. Esta información se ha tomado de fuentes de datos primarios y secundarios (Orús et al. 2000, Orús 2006, Mema 2006, Gobierno de Aragón 2009 y 2010, MARM 2009).

#### 4. ANÁLISIS DE ESCENARIOS

El modelo bioeconómico y las estimaciones de emisiones contaminantes se utilizan para simular políticas de mitigación y adaptación al cambio climático. El procedimiento consiste en evaluar escenarios de medidas plausibles y aceptables técnicamente, que reduzcan la carga de emisiones contaminantes y el uso del agua. Las medidas examinadas son impuestos sobre emisiones, límites de fertilización por cultivo, impuestos sobre los fertilizantes nitrogenados, impuestos sobre el agua de riego, modernización de regadíos, y gestión forestal orientada a la fijación de carbono (Cuadros 2 y 3).

El escenario base representa la asignación actual de suelos, la producción y utilización de factores de producción, y los precios de los productos y los inputs. La renta neta de los agricultores es 278 millones € y el uso de

---

(4) MacCarl (1982) y Önal y McCarl (1991) se basan en la teoría de la programación matemática de Dantzig y Wolfe (1961) para demostrar que los vectores de producciones históricas de cultivos representan elecciones racionales de los agricultores que cumplen las restricciones individuales de disponibilidad de recursos, de manejo agronómico, de tecnologías de producción, y de recursos financieros. Este procedimiento permite trabajar a nivel agregado sin necesidad de tener información detallada sobre cada explotación individual. El procedimiento solo requiere datos estadísticos de producción a nivel local.

agua y nitrógeno alcanza los 2.190 hm<sup>3</sup> y 110.000 t N, respectivamente. Las emisiones de óxido nitroso y de lixiviado de nitrógeno son 912.000 t CO<sub>2</sub>eq y 23.000 t N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, respectivamente. El daño medioambiental de estas emisiones se evalúa en 50 millones €. El bienestar social de las actividades de cultivo es igual a la renta neta menos el daño medioambiental (227 millones €).

Cuadro 2

## RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS

Escenarios	Bienestar (10 <sup>6</sup> €)	Renta (10 <sup>6</sup> €)	Daño (10 <sup>6</sup> €)	Abonado N (10 <sup>3</sup> Tm)	Agua de riego (hm <sup>3</sup> )	Lixiviado N (10 <sup>3</sup> Tm)	Emisiones N <sub>2</sub> O (10 <sup>3</sup> t CO <sub>2</sub> )	Superficie cultivada (10 <sup>3</sup> ha)
Base	227	278	50	110	2.190	23	912	1.062
Impuesto sobre emisiones	281	239	42	93	1.750	17	743	977
Limites de fertilización	262	300	39	88	2.190	18	719	1.062
Impuesto nitrógeno: t <sub>n</sub> =0,5 €/kg	227	225	42	89	1.970	19	744	881
Impuesto nitrógeno: t <sub>n</sub> =1 €/kg	228	182	38	81	1.870	18	675	800
Impuesto agua: t <sub>a</sub> =0,025 €/m <sup>3</sup>	225	226	49	107	2.140	23	888	1.042
Impuesto agua: t <sub>a</sub> =0,05 €/m <sup>3</sup>	217	180	36	83	1.550	17	676	876
Modernización de regadíos	238	281	44	93	2.000	21	773	867

La medida del impuesto sobre emisiones es una medida óptima o “first best” ya que permite alcanzar el nivel óptimo de contaminación y el máximo bienestar social. Este impuesto representa el daño medioambiental de las emisiones y su valor se ha estimado en 22 €/t CO<sub>2</sub>eq para las emisiones de óxido nitroso, y 1,3 €/kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> para las emisiones de lixiviado de nitrógeno, como se ha indicado previamente. Los resultados del escenario muestran que el uso de abonado nitrogenado se reduce a 93.000 t N (-15%), y el consumo de agua se reduce a 1.750 hm<sup>3</sup> (-20%). El efecto de los dos impuestos es considerable, ya que las emisiones de óxido nitroso y lixiviado de nitrógeno caen a 743.000 t CO<sub>2</sub>eq (-19%) y a 17.000 t N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (-26%), respectivamente. El impuesto sobre emisiones reduce

la renta neta hasta 239 millones € (-14%). Este escenario permite alcanzar el máximo bienestar social estimado en 281 millones €, con un incremento de 54 millones € respecto al escenario base.

Varios estudios realizados en la zona (Orús et al. 2000, Orús 2006, Martínez y Albiac 2004 y 2006) señalan el problema de sobreutilización y manejo inadecuado de los fertilizantes nitrogenados. Los agricultores suelen sobrefertilizar los cultivos para asegurar la cosecha y minimizar los riesgos asociados a las condiciones climáticas y las tecnologías de riego. Estimaciones recientes indican que la aportación de fertilizantes nitrogenados orgánicos e inorgánicos supera la necesidad de los cultivos en un 24 por cien. La consecuencia es un excedente de nitrógeno que alcanza las 42.000 t N (11 kg/ha) (MARM 2011), lo que causa daños medioambientales en los ecosistemas terrestres y acuáticos.

El escenario de límites de fertilización plantea reducir la aportación de fertilizante nitrogenado. Los límites se han establecido a partir de las recomendaciones de fertilización proporcionadas por las Informaciones Técnicas del Gobierno de Aragón (Orús 2006), y corresponden a estimaciones de necesidades de abonado de nitrógeno orgánico e inorgánico. La hipótesis clave en estas estimaciones es aplicar una cantidad de fertilizante nitrogenado que no supere el 20 por cien de las extracciones de nitrógeno de cada cultivo. Este escenario de cambio de fertilización nitrogenada supone la mejora de las prácticas agrarias con una reducción de la aportación de nitrógeno, el mantenimiento de los rendimientos, y la mejora de la rentabilidad por los menores costes de fertilización. Conviene señalar además que se pueden aprovechar mejor los enormes excedentes de estiércol disponibles para reducir los costes de fertilización mineral y aumentar los márgenes netos (5). Bajo este escenario, la reducción del abonado hasta 88.000 t N hace caer las emisiones de óxido nítrico y las emisiones de lixiviado de nitrógeno hasta las 719.000 t CO<sub>2</sub>eq (-21%), y las 18.000 t N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (-22%), respectivamente. Esta medida mejora la renta neta de los agricultores (300 millones €, +8%) y el bienestar de la sociedad (262 millones €, +15%).

---

(5) La disponibilidad de nitrógeno de los estiércoles en Aragón podría cubrir el 80 por cien de las necesidades de los cultivos (Orús 2006).

El tercer escenario consiste en gravar el fertilizante nitrogenado mediante tasas elevadas del 50 y 100 por cien. El margen neto de los cultivos se reduce, sobre todo en maíz, cebada y trigo. Un aumento del precio del 50 por cien reduce el uso de nitrógeno a 89.000 t N (-20%) al contraer la superficie cultivada (-17%), y también cae el uso del agua (-10%). Las emisiones de óxido nitroso y de lixiviado de nitrógeno disminuyen hasta 744.000 t CO<sub>2</sub>eq (-18%) y 19.000 t N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (-17%), respectivamente. El daño medioambiental se reduce hasta los 42 millones €, un valor similar al escenario óptimo de impuestos sobre emisiones. Un aumento del precio de nitrógeno del 100 por cien provoca una mayor reducción de las emisiones de óxido nitroso (-26%), y de lixiviado de nitrógeno (-22%), consiguiendo que el daño medioambiental caiga a 38 millones €. El consumo de agua se reduce en 320 hm<sup>3</sup> (-15%). El bienestar social aumenta ligeramente hasta los 228 millones €. El problema de estos impuestos sobre el fertilizante nitrogenado es que provocan una caída importante de la renta de los agricultores de entre el 20 y el 35 por cien.

El escenario de impuesto sobre el agua de riego corresponde a un incremento en los precios de agua, como recomiendan la Directiva Marco del Agua y la Comunicación de la Unión Europea sobre escasez y sequía. La administración europea considera que el aumento de los precios de agua hasta el coste completo de recuperación (costes financieros, medioambientales y del recurso), permite reducir el consumo del agua de riego, fuerza a los agricultores a mejorar la eficiencia de los sistemas de riego, reduce la superficie de riego, y mejora las prácticas agrarias.

Este resultado se deriva de la teoría de la oferta y demanda de bienes privados. Pero es discutible que los precios de agua sirven para reducir la demanda de agua de riego, y la razón de fondo es que el agua de riego es un bien comunal (rivalidad y no exclusión) con externalidades medioambientales. Los instrumentos económicos puros no funcionan correctamente con los bienes comunales (Ostrom 2002).

Bajo este escenario, el precio del agua aumenta de 0,05 a 0,075 y 0,10 €/m<sup>3</sup>. El aumento del precio del agua reduce el margen neto de todos los cultivos, en especial los márgenes netos de los cultivos exigentes en agua como arroz, maíz y alfalfa, pero también el margen neto de la cebada y el trigo. El efecto sobre los márgenes netos de los cultivos leñosos es menor.

Al aumentar el precio del agua hasta 0,075 €/m<sup>3</sup> (un incremento del 50%), el uso de agua se reduce ligeramente y también se reduce ligeramente el abonado, por lo que las emisiones de lixiviado de nitrógeno y de óxido nitroso se mantienen, y el daño medioambiental no cae. El mayor impacto de la subida del precio de agua es una caída del 20 por cien en la renta de los agricultores (hasta 226 millones €) con una ligera reducción de la superficie cultivada. El incremento del precio del agua hasta 0,10 €/m<sup>3</sup> (el doble del precio actual) provoca una fuerte reducción del uso de agua (-29%) y del uso de fertilizantes nitrogenados (-25%). El efecto sobre la contaminación es considerable, con una reducción de las emisiones de óxido nitroso y de lixiviado de nitrógeno del 26 por cien, lo que disminuye el daño medioambiental. Esta medida tiene un coste muy elevado para los agricultores, con una fuerte caída de su renta cercana al 40 por cien y un abandono de superficie de regadío superior al 30 por cien.

Una alternativa para mejorar la gestión del agua y reducir los impactos ambientales del regadío es la modernización de los sistemas de riego, lo que representa un cambio de los procesos de producción agraria. La introducción de nuevas tecnologías de riego modifica sustancialmente las funciones de producción, de costes y de beneficios de los cultivos, así como la productividad de los factores de producción y su nivel óptimo de utilización. Las nuevas tecnologías de riego permiten mejorar el rendimiento de los cultivos y facilitar la sustitución por cultivos más rentables, así como la producción de dos cosechas en zonas con climatología favorable (Lecina et al. 2009).

Para modernizar el regadío mediante riego por aspersión y localizado, es necesario realizar inversiones que tienen costes elevados. Los costes de la inversión se componen de los costes en las redes de distribución primaria y secundaria, y de los costes de amueblamiento en parcela. Aunque los agricultores han recibido subvenciones para facilitar la modernización, estas inversiones son difíciles de amortizar en zonas de cultivos extensivos (cereales y alfalfa). Además la fuerte subida de los costes energéticos ha aumentado considerablemente los costes operativos de los regadíos extensivos. Lecina et al. (2009) estiman los costes de inversión en 9.000 €/ha, lo que equivale a una amortización anual de 300 €/ha tras descontar las subvenciones públicas. Guardia (2010) valora la inversión en 10.000



€/ha, de los que 6.500 €/ha cubren la modernización de la red secundaria y 3.500 €/ha la instalación del sistema de riego en parcela. La estimación de la amortización anual de la inversión con subvenciones es 385 €/ha, lo que obliga a los agricultores de cultivos extensivos a buscar otras fuentes de ingresos.

En este trabajo se considera un coste anual de modernización de 300 €/ha. Los resultados del escenario de modernización muestran una reducción ligera en el uso de agua hasta 2010  $\text{hm}^3$  (-8%), mientras que el uso de los fertilizantes nitrogenados cae a 93.000 t N (-15%). Los efectos medioambientales de la política de modernización de los regadíos son importantes, con una reducción de las emisiones de óxido nitroso del 15 por cien, y del lixiviado de nitrógeno del 9 por cien. Como consecuencia, los daños medioambientales se reducen (44 millones €, -12%) y sube ligeramente la renta de los agricultores (281 millones €, +1%), y el bienestar social (238 millones €, +5%).

El sector agrario actúa también como sumidero de carbono en las actividades forestales y los cultivos leñosos, que capturan carbono de la atmósfera y lo almacenan en sus tejidos a medida que crecen. Las actividades de forestación y reforestación, la gestión de bosques y pastizales, y el restablecimiento de la vegetación se consideran medidas importantes en el marco del protocolo de Kioto para eliminar carbono de la atmósfera. La superficie forestal en Aragón supera el millón y medio de hectáreas, y las principales zonas de bosques se sitúan en comarcas con rentas agrícolas bajas y actividades extensivas como Gúdar-Javalambre, Ribagorza y Sobrarbe.

La cantidad de carbono fijado por los bosques en Aragón se ha estimado de 3,4 millones t  $\text{CO}_2$ /año (Gobierno de Aragón 2008). Los beneficios medioambientales de la fijación de carbono alcanzan los 75 millones €/año utilizando un precio de 22 €/t  $\text{CO}_2$ . Este valor es significativo y supera ampliamente el valor de mercado de las actividades forestales que solo alcanza los 5 millones €/año (IAEST 2007).

En el estudio del Gobierno de Aragón (2008) sobre la funcionalidad de la vegetación leñosa de Aragón como sumidero de  $\text{CO}_2$ , se realizan simulaciones de fijación de carbono con distintas alternativas de manejo forestal

para las cuatro especies principales en Aragón: *Pinus halepensis*, *Pinus sylvestris*, *Pinus nigra* y *Quercus pyrenaica* (Cuadro 3). Los resultados de las simulaciones muestran que un tratamiento silvícola óptimo puede aumentar la fijación de carbono hasta las 700.000 t CO<sub>2</sub> (+20%), lo que supone un beneficio medioambiental adicional superior a 14 millones €, aunque también implica consumir 75 hm<sup>3</sup> adicionales de agua. Esta medida se considera una opción adecuada de mitigación del cambio climático en las cuencas que no sufran excesivos problemas de escasez de agua.

Cuadro 3

## FIJACIÓN DE CARBONO SEGÚN ESPECIE Y ESCENARIO DE MANEJO FORESTAL

Especie	Superficie (ha)	Fijación de carbono (t CO <sub>2</sub> /ha) según escenario*				Incremento** (%)
		Pasivo 120	Pasivo 60	Tratamiento selvícola 1	Tratamiento selvícola 2	
Pinus halepensis	269.800					70
		74,9	45,9	77,8	74,1	
Pinus sylvestris	253.700	Turno muy largo 120 años		Turno largo 80 años		40
		215,4		302,4		
Pinus nigra	124.000	Selvicultura observada		Selvicultura de referencia		6
		295,8		312,8		
Quercus pyrenaica	4.000	Resalveo		Transformación a monte alto		60
		67,5		107,4		

Fuente: Gobierno de Aragón (2008).

\* Los escenarios de manejo forestal se describen en Kahil (2011).

\*\* Porcentaje de incremento de fijación de carbono entre el mejor y el peor escenario de manejo forestal.

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las medidas se evalúan comparando sus efectos sobre el bienestar de la sociedad y la renta de los agricultores, así como el potencial de mitigación de emisiones y de ahorro en el uso del agua. La medida de impuesto sobre emisiones es una medida óptima que permite alcanzar el máximo bienestar social de 281 millones € (+24%), aunque cae la renta de los agricultores (-14%). Esta medida no puede implementarse porque requiere información detallada sobre la carga de emisiones que procede de cada parcela individual, lo que supone un coste prohibitivo.

Entre las medidas sub-óptimas, la medida de límites de fertilización permite mejorar el bienestar social (+15%) y la renta de los agricultores (+8%). El principal problema para implementar límites cuantitativos de fertilización es la dificultad de asegurar el cumplimiento por parte de los agricultores. Una solución para asegurar el cumplimiento de los límites es delegar la responsabilidad de control a las comunidades de regantes, con mediciones de la calidad de agua en los retornos de los polígonos de riego. Esta implementación por las comunidades de regantes sería factible porque ya existe una red de estaciones de medición de la calidad de agua en los principales polígonos de riego en Aragón. El control de las aportaciones de fertilizantes que se utiliza actualmente es el que establece la Directiva de Nitratos, pero solo se aplica a las zonas situadas sobre acuíferos o tramos de ríos declarados oficialmente vulnerables por su elevada concentración de nitratos. En estas zonas, el control se realiza mediante un libro de registro del balance de nitrógeno de cada explotación agraria. La eficacia de este mecanismo de control es cuestionable porque el control se hace de forma aleatoria sobre explotaciones individuales y no se basa en mediciones de la carga contaminante en los cursos y masas de agua. En el resto de zonas de cultivo no existe ningún mecanismo de control, y solo existe una limitación de 210 kg N/ha en el aporte de estiércoles que no se comprueba. Este límite de aporte de nitrógeno es una cantidad excesiva para los cultivos de secano, que genera contaminación (6).

Otra medida de gran interés es la modernización del regadío que mejora el bienestar social (+5%) y también la renta de los agricultores (+1%). Esta medida tiene unos efectos económicos y medioambientales muy beneficiosos, pero su viabilidad financiera depende de las subvenciones públicas. Uku (2003) muestra la necesidad de subvenciones públicas para la modernización de los regadíos. Los únicos cultivos que pueden soportar costes elevados de inversión son los cultivos hortícolas intensivos y rentables como tomate y pimiento. Los resultados de este trabajo sobre modernización de regadíos coinciden con los obtenidos por Uku (2003), aunque en el presente trabajo también se analizan los cultivos leñosos.

---

(6) Las necesidades de nitrógeno de los cereales en secano en Aragón no superan los 94 kg N/ha (Orús 2006).

Los cultivos leñosos pueden soportar los costes de modernización a diferencia de cultivos más extensivos como cereales y alfalfa que requieren subvenciones públicas. Por tanto, la modernización de regadíos tiende a potenciar la expansión de cultivos más intensivos y rentables como hortalizas y leñosos. Estos cultivos intensivos pueden expandir la utilización de agua, fertilizantes y pesticidas, con lo que podría aumentar la presión sobre la cantidad y la calidad del agua.

El instrumento económico del precio del agua es muy poco eficiente para reducir las emisiones contaminantes y el uso del agua, ya que es necesario un fuerte incremento del precio del agua para lograr que se reduzca la cantidad utilizada y las emisiones contaminantes. El inconveniente de subir los precios del agua es que el coste para los agricultores es muy elevado y difícil de aplicar (Cornish et al. 2004, Esteban 2010). La política de precios de agua solo puede funcionar cuando el agua es un bien privado, como es el caso del uso urbano e industrial en red, pero no cuando el agua es un bien comunal como en el regadío o en el uso medioambiental (Albiac 2009).

Desde la perspectiva de mitigación, las medidas de límites a la fertilización e impuestos muy elevados sobre el agua de riego y los fertilizantes nitrogenados, consiguen las mayores reducciones de la contaminación. La política de gestión forestal orientada a la fijación de carbono es una buena alternativa para mitigar las emisiones GEI, pero consume una cantidad importante de agua equivalente al uso urbano e industrial del área metropolitana de Zaragoza (75 hm<sup>3</sup>).

Desde la perspectiva del ahorro de agua, la medida del impuesto sobre el agua de riego permite ahorrar el recurso con precios muy elevados, pero supone un gran coste para los agricultores, pudiendo llegar a generar importantes conflictos sociales. Una ventaja de la política de impuestos sobre el agua de riego, si está bien diseñada, es la creación de incentivos para sustituir las tecnologías de riego antiguas por tecnologías más eficientes, lo que podría reducir las emisiones contaminantes y el uso de agua (Esteban 2010). Por otra parte, la política de modernización de regadíos no ahorra forzosamente recursos hídricos en cuenca, puesto que aunque aumenta la eficiencia del sistema de riego en parcela, los agricultores pueden expandir la evapotranspiración (consumo de agua) con cultivos in-

tensivos en agua, dobles cosechas, o ampliando la superficie de riego. El aumento de la evapotranspiración provoca la caída de los retornos y una menor disponibilidad en cuenca (Playán y Mateos 2006).

La modernización tiene que ir acompañada con la reducción de las concesiones de agua a los polígonos de riego modernizados, de tal forma que no caigan los retornos en cuenca. La actual política de modernización no contempla la reducción de las concesiones cuando aumenta la eficiencia en parcela. Además, el cambio hacia cultivos más rentables e intensivos puede suponer una mayor presión sobre la escasez y degradación de los recursos hídricos (Sumpsi et al. 1998).

## CONCLUSIONES

El cambio climático es uno de los problemas ambientales importantes con los que se enfrenta la sociedad. Los estudios científicos predicen fuertes impactos sobre los seres humanos y los ecosistemas en las distintas regiones del mundo. En la cuenca Mediterránea se prevé una reducción de las disponibilidades hídricas del 30-40 por cien, una caída de la disponibilidad de agua por persona de hasta el 70 por cien, y un empeoramiento de la calidad del agua (IPCC 1996b, 2007). El sector agrario es un sector clave en las políticas de cambio climático, ya que tiene una doble influencia sobre el cambio climático como sector emisor de gases de efecto invernadero, y como sumidero que fija carbono de la atmósfera.

En Aragón, las actividades agroganaderas y forestales ocupan el 90 por cien del territorio, y están generando una cantidad importante de emisiones GEI. Un resultado de este trabajo es la estimación de las emisiones GEI del sector agrario, que superan los tres millones de t CO<sub>2</sub>eq, y suponen el 20 por cien del total de emisiones. Este porcentaje es superior a la contribución del sector a las emisiones GEI en toda España. Las actividades de cultivo utilizan fertilizantes nitrogenados que generan casi un millón de t CO<sub>2</sub>eq de óxido nitroso y 23.000 t N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> de emisiones de lixiviado de nitrógeno.

Los resultados de este trabajo muestran que los límites de fertilización y la modernización de regadíos son las mejores medidas sub-óptimas, por-

que reducen la contaminación y mejoran el bienestar social y la renta de los agricultores. Sin embargo, estas políticas presentan algunos obstáculos técnicos, financieros y de organización, como las dificultades para hacer cumplir los límites de fertilización, la débil viabilidad financiera de los proyectos de modernización de regadíos, y los costes elevados de transacción en la implementación y cumplimiento de estas políticas. Estos obstáculos pueden superarse mediante la intervención pública y el aprovechamiento de las actuales instituciones de cooperación de los regantes, como las autoridades de cuenca y las comunidades de regantes. Esta intervención pública para lograr la acción colectiva es un factor clave para orientar la respuesta de los agricultores ante el cambio climático.

Una cuestión importante de política de agua es el énfasis que se da a los instrumentos económicos para solucionar los problemas de escasez y degradación de los recursos hídricos. La política de agua en Europa pivota entorno a los precios del agua y el coste completo de recuperación, pero estos instrumentos económicos no pueden funcionar cuando el agua es un bien comunal como ocurre en el regadío (Esteban y Albiac 2011). Este trabajo muestra que el aumento del precio de agua es una medida muy poco eficiente que genera pérdidas sustanciales tanto de bienestar social como de renta de los agricultores. Además crea incentivos para actividades ilegales o alegales de extracción de aguas subterráneas, un problema que ya es muy serio en España (Albiac et al. 2008). Para garantizar una buena gestión de los recursos hídricos en el sector agrícola, es necesario utilizar las instituciones que ya existen en España, donde cooperan los grupos de interés y se consigue la acción colectiva. Esta acción colectiva es imprescindible tanto para limitar las extracciones excesivas como para reducir la contaminación difusa, en especial donde los ecosistemas acuáticos son especialmente valiosos.

Los bosques en Aragón desempeñan una función importante en la mitigación de las emisiones GEI. La gestión forestal puede orientarse hacia la fijación del carbono, aunque teniendo en cuenta que la expansión de los bosques tiene efectos importantes sobre el balance de agua en las cuencas y los ecosistemas acuáticos (Otero et al. 2010).

El diseño y evaluación de las medidas de control de la contaminación agrícola es un proceso complejo, que requiere generar información bio-

física y económica fiable sobre las características físicas y estructurales de las explotaciones agrarias, y sobre el manejo agronómico y las tecnologías de producción utilizadas. También es importante tener información detallada sobre los procesos de contaminación, el daño medioambiental de la carga contaminante, el coste del daño, y la dinámica de nutrientes en el suelo. Otro aspecto importante en el diseño de políticas de cambio climático es el de los mecanismos de implementación y cumplimiento de estas políticas y sus costes. Un ejemplo claro es la política de precios del agua que preconizan las administraciones europea y española. Como se ha señalado, el agua de riego es un bien comunal y la política de precios tiene problemas de costes de transacción y de viabilidad política. Estos problemas no se han analizado con detalle, pero afectan claramente el funcionamiento de las políticas medioambientales de cambio climático.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no se hubiera podido llevar a cabo sin la información y el apoyo de los siguientes especialistas: Javier Tapia, Eduardo Notivol, Sergio Lecina (CITA) y Fernando Orús (CTA). El trabajo se ha realizado en el marco de los proyectos GA-LC-001/2010 Gobierno de Aragón-La Caixa e INIA RTA2010-00109-C04-01. Los autores quieren agradecer de manera especial el apoyo del Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza (IAMZ/CIHEAM) y del Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA).

## BIBLIOGRAFÍA

- ALBIAC, J.; TAPIA, J.; MEYER, A.; HANEMANN, M.; MEMA, M.; CALATRAVA, J.; UCHE, J. y CALVO, E. (2008). "Los problemas económicos de la planificación hidrológica". *Revista de Economía Aplicada*, 47: p. 25-50.
- ALBIAC, J. (2009). "Nutrient Imbalances: Pollution Remains". *Science*, 326(5953), 665b.
- BENEKE, R. y WINTERBOER, R. (1984). *Programación lineal: Aplicación a la agricultura*. AEDOS. Barcelona.
- BOSELLO, F.; GIUPPONI, C. y POVELLATO, A. (2007). *A review of recent studies on cost effectiveness of GHG mitigation measures in the Eu-*

- ropean agro-forestry sector. Nota di Lavoro 14. Fondazione Eni Enrico Mattei. Milán.
- CAUSAPÉ, J.; QUILEZ, D. y ARAGÜES, R. (2004). "Salt and nitrate concentrations in the surface waters of the CR-V irrigation district (Bardenas I, Spain): diagnosis and prescriptions for reducing off-site contamination". *Journal of Hydrology*, 295: p. 87-100.
- CAVERO, J.; BELTRÁN, A. y ARAGÜES, R. (2003). "Nitrate exported in drainage waters of two sprinkler-irrigated watersheds". *Journal of Environmental Quality*, 32: p. 916-926.
- COMISIÓN EUROPEA (CE) (1991). *Directiva 91/676/CE del Consejo de 12 de diciembre de 1991 relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura*. Comisión Europea. Bruselas.
- COMISIÓN EUROPEA (CE) (2000). *Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas*. Comisión Europea. Bruselas.
- COMISIÓN EUROPEA (CE) (2007). *Afrontar el desafío de la escasez de agua y la sequía en la Unión Europea*. COM (2007) 414. Comisión Europea. Bruselas.
- CORNISH, G.; BOSWORTH, B.; PERRY, C. y BURKE, J. (2004). *Water charging in irrigated agriculture: an analysis of international experience*. FAO water report 28. Roma.
- DANTZIG, G. y WOLFE, P. (1961). "The decomposition algorithm for linear programming". *Econometrica*, 29: p. 767-778.
- DE CARA, S.; HOUZÉ, M. y JAYET, P.A. (2005). "Methane and nitrous oxide emissions from agriculture in the EU: a spatial assessment of sources and abatement costs". *Environmental and Resource Economics*, 32: p. 551-583.
- ENVIRONMENTAL EUROPEAN AGENCY (EEA) (2006). *Annual European community greenhouse gas inventory 1990-2004 and inventory report 2006*. Technical report 6. EEA. Copenhagen.
- ENVIRONMENTAL EUROPEAN AGENCY (EEA) (2007). *Climate change and water adaptation issues*. Technical report 2. EEA. Copenhagen.
- ESTEBAN, E. (2010). *Water as a common pool resource: collective action in groundwater management and nonpoint pollution abatement*. Ph.D. thesis. University of Zaragoza. Zaragoza.



- ESTEBAN, E. y ALBIAC, J. (2011). "Groundwater and ecosystems damages: questioning the Gisser-Sánchez effect". *Ecological Economics*, 70: p. 2062-2069.
- ESTRATEGIA ARAGONESA DE CAMBIO CLIMÁTICO Y ENERGÍAS LIMPIAS (EACCEL) (2011). *Las emisiones de gases efecto invernadero en Aragón: evolución 1990-2009*. Departamento de Medioambiente. Gobierno de Aragón. Zaragoza.
- GOBIERNO DE ARAGÓN (2008). *Informe final del estudio sobre la funcionalidad de la vegetación leñosa de Aragón como sumidero de CO<sub>2</sub>*. Unidad de Recursos Forestales. CITA. Gobierno de Aragón. Zaragoza.
- GOBIERNO DE ARAGÓN (2009). *Base de datos IT de superficies de cultivos por término municipal para Aragón 2004-2008*. Departamento de Agricultura y Alimentación. Gobierno de Aragón. Zaragoza.
- GOBIERNO DE ARAGÓN (2010). *Anuario estadístico agrario de Aragón 2008-2009*. Sección de Estadística del Departamento de Agricultura y Alimentación. Gobierno de Aragón. Zaragoza.
- GUARDIA, S. (2010). "Amortizar la modernización: un problema pendiente de resolución". *Boletín Inter Cuencas*, 23:13. FENACORE. Madrid.
- HEDIGER, W. (2006). "Modeling GHG emissions and carbon sequestration in Swiss agriculture: an integrated economic approach". *International Congress Series*, 1293: p. 86-95.
- HOUGHTON, J. (2001). "The science of global warming". *Interdisciplinary Science Reviews*, 26(4): 247-257.
- IGLESIAS, A. (2009). "Policy issues related to climate change in Spain". En A. Dinar y J. Albiac (Eds): *Policy and strategic behavior in water resource management*. Earthscan. Londres.
- INSTITUTO ARAGONÉS DE ESTADÍSTICA (IAEST) 2007. *Evolución de la producción forestal y valor de la producción: Aragón (1989-2004)*. Medioambiente. Zaragoza.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) (1996a). *Directrices del IPCC para los inventarios de gases de efecto invernadero, versión revisada en 1996: libro de trabajo*. IPCC. Londres.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) (1996b). *Climate change 1995: impacts, adaptation and mitigation of climate*

- change: scientific-technical analyses. Contribution of working group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* IPCC. Londres.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) (2001). *Cambio climático 2001: la base científica (resumen técnico). Contribución del grupo de trabajo I al tercer informe de evaluación del IPCC.*
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) (2007). *Cambio climático 2007: informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.* IPCC. Ginebra.
- ISIDORO, D. (1999). *Balance de nitrógeno y emisión de sales en la zona regable de la Violada (Huesca).* Tesis doctoral. Universidad de Lérida. Lérida.
- KAHIL, M.T. (2011). *Instrumentos de mitigación y adaptación al cambio climático en la agricultura de Aragón.* Tesis master. Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza. Zaragoza.
- KOUNDOURI, P. y CHRISTOU, C. (2006). “Dynamic adaptation to resource scarcity and backstop availability: theory and application to groundwater”. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 50(2): p. 227-245.
- LECINA, S.; ISIDORO, D.; PLAYÁN, E. y ARAGÜÉS, R. (2009). “Efecto de la modernización de regadíos sobre la cantidad y la calidad de las aguas: la cuenca del Ebro como caso de estudio”. *Monografías INIA: Serie Agrícola*, 26. INIA. Madrid.
- LEHNER, B.; DÖLL, P.; ALCAMO, J.; Henrichs, H. y KASPAR, F. (2005). “Estimating the impacts of global change on food and drought risks in Europe: a continental integrated assessment”. *Climatic Change*, 75: p. 273-299.
- MARTÍN-ORTEGA, J. (2011). “Costs of adaptation to climate change impacts on freshwater systems: existing estimates and research gaps”. *Economía Agraria y Recursos Naturales*, p. 11: 5-28.
- MARTÍNEZ-COB, A.; FACI, J. y BERCERO, A. (1998). *Evapotranspiración y necesidades de riego de los principales cultivos en las comarcas de Aragón.* Institución Fernando el Católico. Zaragoza.
- MARTÍNEZ, Y. y ALBIAC, J. (2004). “Agricultural pollution control under Spanish and European environmental policies”. *Water Resources Research*, 40, doi: 10.1029/2004WR003102.

- MARTÍNEZ, Y. y ALBIAC, J. (2006). "Nitrate pollution control under soil heterogeneity". *Land Use Policy*, 23: p. 521-532.
- MCCARL, B. (1982). "Cropping activities in agricultural sector models: a methodological proposal". *American Journal of Agricultural Economics*, 64(4): p. 768-772.
- MEMA, M. (2006). *Las políticas de control de la contaminación difusa en el valle medio del Ebro*. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza. Zaragoza.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL y MARINO (MARM) (2005). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*. Proyecto ECCE - Informe Final. Oficina Española de Cambio Climático. Madrid.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL y MARINO (MARM) (2009). *Análisis de la economía de los sistemas de producción: resultados técnico-económicos de explotaciones agrícolas de Aragón en 2008*. Subsecretaría de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. Madrid.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL y MARINO (MARM) (2010a). *Inventario de gases de efecto invernadero en España. Edición 2010 (Serie 1990-2008). Sumario de resultados*. Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental. MARM. Madrid.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL y MARINO (MARM) (2010b). *Boletín mensual de estadística: cambio climático*. Secretaría General Técnica. MARM. Madrid.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL y MARINO (MARM) (2011). *Balance del nitrógeno en la agricultura Española 2009*. Dirección General de Recursos Agrícolas y Ganaderos. MARM. Madrid.
- ÖNAL, H. y McCarl, B. (1991). "Exact aggregation in mathematical programming sector models". *Canadian Journal of Agricultural Economics*, 39: p. 319-334.
- ORÚS, F.; QUÍLEZ, D. y BETRÁN, J. (2000). El código de buenas prácticas agrarias (I): fertilización nitrogenada y contaminación por nitratos. *Informaciones Técnicas*, 93. Servicio de Formación y Extensión Agraria. Dirección General de Tecnología Agraria. Gobierno de Aragón. Zaragoza.
- ORÚS, F. (Coordinador) (2006). Fertilización nitrogenada: Guía de actualización. *Informaciones Técnicas*, número extraordinario. Centro de

- Transferencia Agroalimentaria. Dirección General de Desarrollo Rural. Gobierno de Aragón. Zaragoza.
- OSTROM, E. (2002). "Common-pool resources and institutions: toward a revised theory". En B. Gardner y G. Rauser (Eds): *Handbook of Agricultural Economics*, 2. Elsevier. Amsterdam.
- OTERO, I.; BOADA, M.; BADIA, A.; PLA, E.; VAYREDA, J.; SABATÉ, S.; GRACIA, C. y PENUELAS, J. (2010). "Loss of water availability and stream biodiversity under land abandonment and climate change in a Mediterranean catchment (Olzinelles, NE Spain)". *Land Use Policy*, 28(1): p. 207-218.
- PÉREZ DOMÍNGUEZ, I.; BRITZ, W. y HOLM-MÜLLER, K. (2004). "Trading schemes for greenhouse gas emissions from European agriculture: a comparative analysis based on different implementation options". *Review of Agricultural and Environmental Studies*, 90 (3): p. 287-308.
- PERMAN, R.; MA, Y.; MCGILVRAY, J. y COMMON, M. (2003). *Natural resource and environmental economics*. Third edition. Pearson Addison Wesley. Edinburgh.
- PLAYÁN, E. y MATEOS, L. (2006). "Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity". *Agricultural Water Management*, 80(1-3): p. 100-116.
- RIBAUDO, M.; DELGADO, J. y LIVINGSTON, M. (2011). "Preliminary assessment of nitrous oxide offsets in a cap and trade program". *Agricultural and Resource Economics Review*, 40 (2): p. 266-281.
- SCHNEIDER, U.A.; MCCARL, B.A. y SCHMID, E. (2007). "Agricultural sector analysis on greenhouse gas mitigation in US agriculture and forestry". *Agricultural Systems*, 94: p. 128-140.
- STERN, N. (2007). *The economics of climate change*. The Stern Review. Cambridge University Press. Cambridge.
- SUMPSI, J.; GARRIDO, A.; BLANCO, M.; VARELA, C. e IGLESIAS, E. (1998). *Economía y política de gestión del agua en la agricultura*. Mundi-Prensa. Madrid.
- TOL, R. (2004). "The marginal damage costs of carbon dioxide emissions: an assessment of the uncertainties". *Energy Policy*, 33(16): p. 2064-2074.
- UKU, S. (2003). *Análisis económico y medioambiental de los sistemas de riego: una aplicación al riego de Bardenas*. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza. Zaragoza.

- UNITED NATION FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC) (2008). *Challenges and opportunities for mitigation in the agricultural sector*. Technical paper 8. United Nations.
- VARIAN, H.R. (1998). *Análisis microeconómico*. Tercera edición. Antoni Bosch editor. Barcelona.
- WATKISS, P.; DOWNING, T.; HANDLEY, C. y BUTTERFIELD, R. (2005). *The impacts and costs of climate change*. Final report. European Commission. Londres.
- WIGLEY, T. (1999). *The science of climate change: global and U.S perspectives*. Pew Center on Global Climate Change, Arlington. Virginia.

## RESUMEN

### Instrumentos de política de cambio climático en la agricultura de Aragón

El cambio climático es una de las grandes amenazas a las que se enfrenta la sociedad humana. El sector agrícola es una fuente de emisiones contaminantes y a la vez de alternativas para mitigar el cambio climático. La sustitución de la agricultura tradicional por la agricultura intensiva en inputs y capital, ha generado daños ambientales importantes debido a la carga de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y a las pérdidas de nutrientes. En este trabajo se realiza una estimación de la carga de emisiones GEI y de emisiones de nitrógeno de origen agrario en Aragón. Las distintas medidas de mitigación y adaptación al cambio climático se examinan utilizando un modelo bioeconómico. Los resultados muestran que los límites de fertilización y la modernización de regadíos son buenas medidas para la mitigación de las emisiones. También se comprueba, que los instrumentos económicos no son medidas muy adecuadas para reducir la contaminación difusa. El trabajo muestra además la importancia de los bosques en Aragón como sumideros de carbono.

**PALABRAS CLAVE:** Cambio climático, Modelización bioeconómica, Eficiencia de las medidas, Instrumentos económicos, Sumideros de carbono.

**CÓDIGOS JEL:** Q54, D78, C61.

## SUMMARY

### Climate change policy instruments in the agriculture of Aragon

Climate change is an important threat to human society. The agricultural sector is a source of greenhouse gases (GHG) but also it provides alternatives to confront climate change. The expansion of intensive agriculture during recent decades has generated significant environmental damages because of the GHG emissions and nutrient loads. This study presents an assessment of GHG emissions and nitrogen emission loads in the agriculture of Aragon. Several mitigation and adaptation measures to climate change are examined using a bioeconomic model. The results indicate that standards limiting nitrogen fertilization and investments in irrigation modernization are appropriate mitigation measures to abate emissions. Another finding is that economic instruments are not very well suited measures to abate nonpoint pollution. The study also shows the importance of forest in Aragon as carbon sinks.

**KEY WORDS:** Climate change, Bioeconomic modelling, Efficiency of measures, Economic instruments, Carbon sinks.

**JEL CODES:** Q54, D78, C61