

CAMBIO CLIMÁTICO Y SU EFECTO MARGINALIZADOR EN LA AGRICULTURA

Fernando Mestre Sanchís

Departamento de Métodos Estadísticos

Universidad de Zaragoza

e-mail: fmestre@unizar.es

José María Moreno Jiménez

Departamento de Métodos Estadísticos

Universidad de Zaragoza

e-mail: moreno@unizar.es

María Luisa Feijóo Bello

Departamento de Análisis Económico

Universidad de Zaragoza

e-mail: mfeijoo@unizar.es

Resumen

La agricultura de algunas zonas consideradas históricamente marginales en contexto agrario de UE está siendo cuestionada por su baja productividad y creciente dependencia de las ayudas comunitarias (PAC). El presente trabajo muestra como el cambio climático agudiza este proceso marginalizador al empeorar notablemente las condiciones de cultivo. La influencia del cambio climático en el sector agrario se analiza utilizando el Paradigma de la Decisión Multicriterio y empleando la información proporcionada por EPIC (Environmental Policy Impact Calculator) y los GCMs (General Circulation Models) como inputs de los modelos de programación matemática multicriterio considerados. La metodología propuesta se ha aplicado a la comarca de Monegros (Aragón, España). Los resultados obtenidos muestran la especial incidencia de las condiciones climáticas en las alteraciones del medio físico y, consecuentemente, en la composición de las carteras de cultivos. Esto a su vez supone la existencia de efectos adversos tanto en el aspecto medioambiental con la pérdida de suelos cultivables, como en el aspecto social por la pérdida de puestos de trabajo asociados al sector agrario.

Palabras clave: Cambio Climático, Decisión Multicriterio, EPIC, Sector Agrario, GCMs.

1. Introducción

Los componentes de la atmósfera, llamados Gases de Efecto Invernadero (GEI) son aquellos que absorben la radiación emergente de la superficie terrestre, que de otra forma sería emitida al espacio. La *composición* y *mezcla* de estos gases, hace posible la vida en la Tierra (Tietenberg, 1992). Durante los últimos años, la actividad humana está incidiendo tanto en la *composición* como en la *mezcla* de la atmósfera, modificando de ese modo el clima. A pesar de los avances tecnológicos, la producción agraria continúa teniendo una estrecha dependencia del clima, y en consecuencia, se ve afectada por el fenómeno del cambio climático. La incidencia del cambio climático en la agricultura se manifiesta fundamentalmente en los efectos producidos directamente en el propio cultivo, por los elementos climáticos (radiación, temperatura, precipitación, etc.) y también indirectamente, a través de cambios que afectan al medio físico y biológico. Una de las secuelas más serias que depara el Cambio Climático en la agricultura, es la que se deriva de las alteraciones de disponibilidad de agua, que harán más frecuente la escasez del recurso. Sus efectos se derivan de un incremento de la evapotranspiración potencial, debida al ascenso de las temperaturas del aire y de la superficie terrestre. Este fenómeno adquiere importancia relevante en estaciones de baja precipitación siendo aún mayor en zonas secas. Cada vez con mayor certeza se señala hacia las mismas regiones en las que se prevén pérdidas del contenido hídrico del suelo, por este motivo resulta de vital importancia considerar el agua en la construcción de los escenarios, ya que ésta tiene incidencia económica directa en la capacidad de producción. (IPCC, Informe WGII, 1992 y sucesivos). Esta pérdida de humedad del suelo supone una reducción significativa de la potencialidad productiva de los cultivos en secano, lo que en algunos casos puede comprometer su viabilidad económica. En los cultivos en regadío, el efecto es percibido a través de los costes, por unos mayores volúmenes de agua requeridos por parcela al aumentar la evapotranspiración, y también por el incremento de las tarifas de agua esperadas al aumentar la demanda.

En los estudios de impacto de cambio climático, es esencial tomar en consideración el riesgo que tendrá que asumir el agricultor con esta nueva situación, para ello hay que plantear distintos escenarios de riesgo derivados de la irregularidad climática que surge de

las alteraciones provocadas por los *fenómenos climáticos extremos* que pueden manifestarse en los diferentes parámetros climáticos (Temperatura, Precipitación, Velocidad del viento y otros). Así, contribuyen a incrementar el riesgo, las temperaturas extremas que salen de los rangos habituales, la reducción de las precipitaciones, y/o la concentración de las mismas en períodos de lluvias mas cortos. Esto podría reducir las posibilidades de producción tanto en secano como en regadío. En los casos en que las precipitaciones sean insuficientes para compensar el aumento de la evapotranspiración, en especial en áreas de producción marginal, puede aumentar de manera significativa la superficie sin cultivar (IPCC, Informe WGII, 1992 y sucesivos).

Los incrementos de intensidad de las lluvias afectan a los índices de erosión y desertificación del suelo y también las altas tasas de evapotranspiración dan lugar a una mayor frecuencia de períodos en los cuales la superficie del suelo está seca y por tanto más propensa a la erosión del viento. Las alteraciones de la fertilidad del suelo, debidas a los cambios de los regímenes pluviométricos, a largo plazo pueden acentuarse como consecuencia de la lixiviación de nutrientes. Esto tiene repercusiones económicas directas, al ser necesaria la aportación adicional de fertilizantes para suplir esa carencia. (Orús y otros 2000).

La exposición al riesgo y la búsqueda de instrumentos para su gestión forman parte inherente de la actividad agrícola. Por ello, los agricultores ven, con relativa frecuencia, arruinarse sus producciones a consecuencia de fenómenos naturales no controlables. Si bien la incidencia de los riesgos naturales es diferente en las distintas zonas productoras, el desarrollo de la actividad agraria se encuentra, en todas ellas, expuesto a las consecuencias de estos fenómenos no controlables. Ante esta situación, los agricultores se enfrentan a un importante reto, ya que no teniendo resueltos, los procedimientos para la gestión de los riesgos naturales, ya es necesario empezar a trabajar en la búsqueda de soluciones eficaces para afrontar riesgos cada vez más complejos, debidos al cambio climático, que trascienden de estos fenómenos climatológicos o naturales.

Las modificaciones que se han introducido en la definición de las políticas agrarias a lo largo de los últimos años, han ido originando variaciones en el grado de exposición al riesgo y en su percepción por el productor agrario. Así por ejemplo, hasta hace pocos años, como consecuencia de las políticas de garantía de precios contempladas en la PAC para muchos de los principales cultivos, los riesgos derivados del mercado no constituían un motivo de preocupación para el sector agrario.

Las expectativas que desde el ámbito científico se están creando en relación con el cambio climático y su incidencia sobre las futuras condiciones productivas, hacen necesario disponer de instrumentos idóneos que minimicen las consecuencias económicas de los nuevos riesgos.

Considerando todos estos efectos, el principal objetivo de este artículo se centra en la determinación de la “mejor cartera de cultivos” para el agricultor, ante diferentes escenarios climáticos asociados a la concentración de los GEI, teniendo en cuenta, tanto las interrelaciones entre la disponibilidad de agua prevista y los rendimientos de los cultivos en secano y en regadío, cómo los efectos de ello sobre la cartera de cultivos. En primer lugar, se presenta la elaboración de escenarios de cambio climático y de disponibilidad de recursos hídricos, así como la toma en consideración del riesgo, como claves que implican cambios de cultivos y de técnicas agrícolas, ambos hechos, suponen un aumento de los costes de explotación y por ende una caída en la renta agraria (IPCC, 2001), con el consiguiente proceso marginalizador de las explotaciones agrarias. Para ello se emplea un modelo de simulación de cultivos como instrumento para la captación de los impactos en el medio físico y biológico y Modelos de Circulación General (GCMs) para obtener los parámetros de clima modificado. Con los resultados obtenidos, aplicando la metodología multicriterio, se determina finalmente el mejor plan de cultivos, para el agricultor.

Los escenarios planteados son: uno de referencia (Escenario 1, $1xCO_2$), con datos climáticos medidos en la localidad de estudio; otro, (Escenario 2) derivado de los datos simulados por los GCM para la misma localidad, también con atmósfera regular ($1xCO_2$); y por último, el escenario de cambio climático (Escenario 3), con doble concentración de CO_2 equivalente ($2xCO_2$).

La forma de validar el modelo de decisión consiste en determinar un plan de cultivos que refleje, de la manera mas aproximada posible, la selección de cultivos hecha por los agricultores de la zona considerada.

Los escenarios en relación con el recurso, son de disponibilidad de agua, en el que se producen reducciones del 10%, 20% y 30% de los suministros de agua de riego en diferentes partes del ciclo vegetativo. Los porcentajes de reducción considerados en los escenarios surgen de los descensos medios de recursos hídricos estimados para la cuenca del Ebro, (WWF, 2001; Ayala-Carcedo, 1996).

Los modelos de simulación de cultivos basan su funcionamiento en imitar la capacidad de las plantas de transformar la energía solar en biomasa y de ese modo constituyen un recurso imprescindible para captar los cambios de las variables climáticas, o de condiciones de cultivo que se traducen en diferencias de rendimiento. En este artículo empleamos el modelo de simulación de cultivos EPIC (Environmental Policy Impact Calculator), que ha sido diseñado para simular simultáneamente los procesos biofísicos que tienen lugar en el suelo y en los cultivos, y permite hacer simulaciones con una amplia variedad de suelos, climas y cultivos. La utilización de EPIC en estudios de cambio climático está ampliamente difundida, con frecuencia se emplea para el análisis de impacto regional o al nivel de explotación, con el objetivo de predecir efectos a corto y largo plazo (Stratus Consulting Inc., 1999). La simulación de cultivos, permite mejorar las prestaciones de la programación matemática y resolver los problemas que existen entre la producción y el consumo de factores. La simulación con EPIC complementa el modelo y permite ajustar los coeficientes técnicos del mismo con mayor flexibilidad y precisión que los estimados por otros métodos.

Las simulaciones arrojan resultados respecto a diversas variables del cultivo de la que nos interesa especialmente el rendimiento de producto por hectárea. Con estos rendimientos por hectárea, obtenemos los márgenes netos del cultivo. A continuación, la construcción del modelo de decisión basado en las técnicas multicriterio, nos permite seleccionar diferentes

carteras de cultivos en función de los cambios que se vayan produciendo en las condiciones en que los cultivos se llevan a cabo.

Finalmente se ha utilizado la programación por compromiso para resolver el modelo de forma similar al proceso que siguen los empresarios agrícolas en la toma de decisiones. Dicho proceso, se lleva a cabo en un marco de creciente complejidad, en el que además del resultado económico entran en juego aspectos ambientales, sociales y culturales a los que se añade la mayor o menor aversión al riesgo que incide en las decisiones empresariales (Hazell y otros, 1986). Los empresarios agrícolas intentan satisfacer, en la medida de lo posible, todas las condiciones de manera simultánea. Son numerosos los trabajos que de manera empírica ponen de manifiesto este comportamiento. (Romero, C. 1993; Amador y otros 1998; Feijóo y otros 2000; Bocco y otros 2000; Gómez-Limón, 2002). En un contexto de cambio climático como el que estamos analizando, tiene aún mas relevancia la toma de decisiones sobre una base realista que emplee diferentes criterios a la hora de seleccionar la cartera de cultivos mas conveniente.

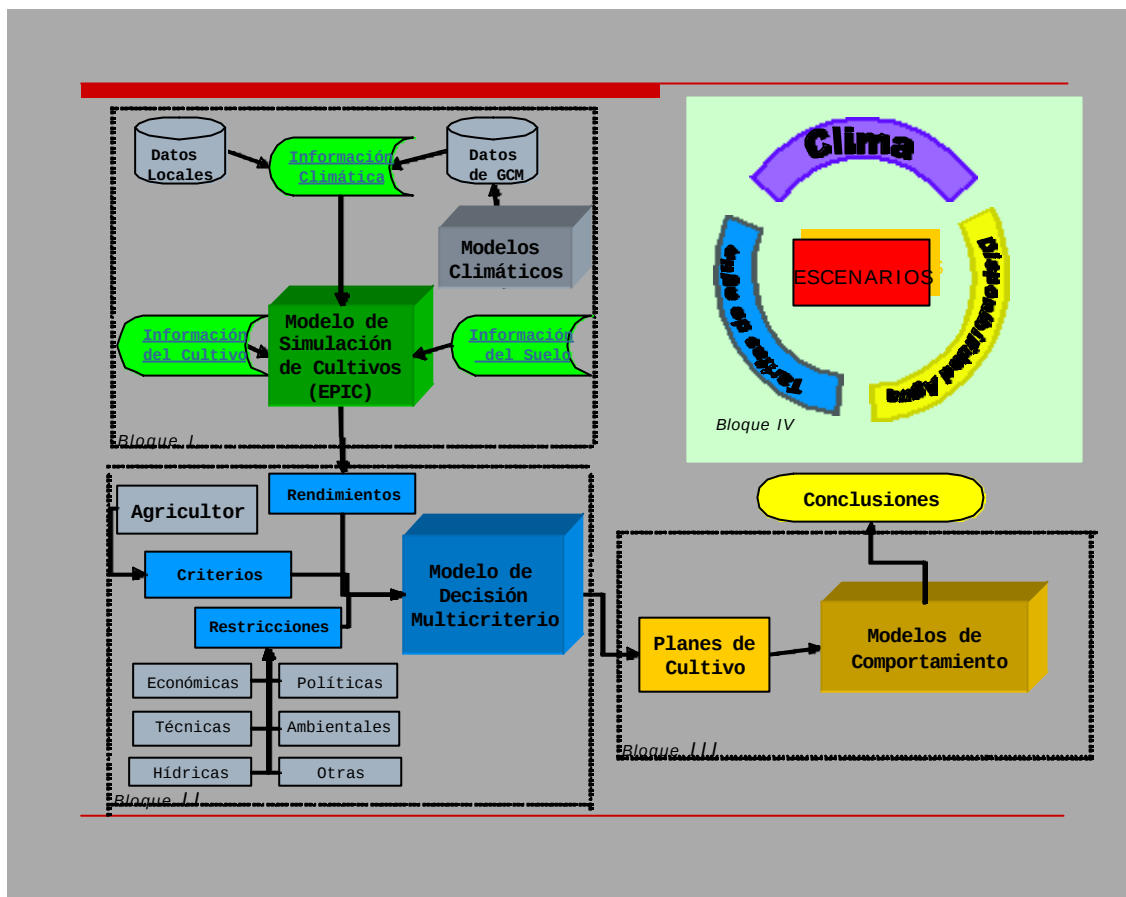
El artículo se estructura como sigue: la sección 2 incluye la metodología seguida en el estudio; la sección 3 recoge el caso práctico considerado y la 4 los resultados obtenidos. Por último en la sección 5 se destacan las conclusiones más importantes.

2. Metodología

La metodología que se propone nos permite analizar el comportamiento general de las unidades de decisión económica (explotaciones agrarias) y con ello determinar la mejor cartera de cultivos en la que se recojan los efectos producidos por las variables físicas, biológicas y climatológicas. La evaluación de las diferentes carteras de cultivos se efectúa siguiendo una aproximación metodológica multiobjetivo en la que como pasos intermedios se recurre a la optimización tradicional desde un punto de vista económico. En relación con el enfoque del trabajo, por una parte se intenta explicar cómo se comportan los centros decisores en la situación actual (enfoque descriptivo) mientras que por otra, para los diferentes escenarios, se pretende determinar como deberían comportarse esos agentes

(enfoque prescriptivo) para llevar a cabo la selección de cartera en un contexto de cambio climático (Bell M. y otros 1998).

Figura 1. Esquema de la metodología propuesta



La metodología propuesta, tal como muestra el esquema, se concentra en tres bloques de diagramas de flujo. En ellos se ven los diferentes modelos que intervienen en el desarrollo metodológico propuesto cuya secuencia se origina en los modelos climáticos y de simulación de cultivos, pasando por el modelo de decisión multicriterio que aporta fundamentos que sirven para detectar modelos de comportamiento y finalmente un cuarto bloque muestra algunos de los escenarios que pueden ser examinados con esta metodología.

El bloque I, constituye un mecanismo generador de los escenarios que se quieren estudiar. El modelo de simulación de cultivos es la forma en que los diferentes factores productivos agrarios (clima, suelo y cultivo) son captados para obtener los rendimientos que de estos se obtienen. La información climática que sirve de input para la simulación de cultivos puede ser medida o simulada por diferentes modelos climáticos, el output obtenido en este bloque son los rendimientos de producto por hectárea de cada cultivo simulado, esto permite generar diferentes escenarios.

El bloque II, muestra el componente esencial de la metodología propuesta, aquí se plantea un modelo de decisión multicriterio en el que se tienen en cuenta los *rendimientos* obtenidos por el modelo de simulación de cultivos en el bloque anterior, expresados como Margen Neto, por otra parte se toman en cuenta los *criterios* imputados a un agricultor con experiencia y las *restricciones* que limitan las decisiones de cultivo de tipo que se contemplan en el modelo para lograr los mejores planes de cultivo en los diferentes escenarios. Las restricciones del modelo aparecen agrupadas en seis categorías: económicas, técnicas, políticas, ambientales, hídricas y otras.

Por su parte en el bloque III, se presentan los planes de cultivo de los diferentes escenarios estudiados, éstos permiten avanzar en el conocimiento de los modelos de comportamiento de los agentes implicados, tanto en los escenarios de referencia como en los propuestos para el análisis de políticas alternativas.

Finalmente en el bloque IV, muestra cuatro de los escenarios propuestos para ser estudiados, partiendo de los inputs adecuados aportados en los modelos de simulación de cultivos y de decisión multicriterio.

La metodología se basa en la construcción de un modelo matemático multiobjetivo que permite simular las decisiones de los responsables de explotaciones agrarias ante diferentes escenarios, de los que se dispone de amplia información proveniente de diferentes áreas del conocimiento, relativos a los recursos hídricos y derivados del cambio climático cuyos efectos son recogidos con el auxilio de un modelo de simulación de cultivos.

La característica metodológica a destacar en este trabajo, reside en que para extraer el resultado de cada bloque, el área del conocimiento que prevalece es diferente, así en el primero es necesario un adecuado conocimiento de fitotecnia y de simulación de cultivos, en el segundo resulta obvio que es necesario un apropiado conocimiento de las técnicas de decisión multicriterio para hacer una buena selección de planes de cultivo. En el tercer bloque es imprescindible un adecuado conocimiento del comportamiento de los centros decisores, es decir la idiosincrasia de los empresarios agrarios de la zona en que se lleva a cabo el estudio. En la medida en que exista una mayor solidez de los conocimientos específicos necesarios para resolver cada uno de los bloques, el resultado final y las conclusiones que se alcancen serán lógicamente mas fiables, para la propuesta de políticas acertadas.

La técnica de programación matemática utilizada es la programación por compromiso (PPC). Esta técnica que se ha utilizado en sus comienzos en entornos continuos ha sido adaptada para analizar problemas multicriterio de tipo discretos. Es utilizada para identificar soluciones que se encuentran cercanas a una solución ideal aplicando para ello alguna medida de distancia. Estas soluciones se denominan soluciones compromiso y constituyen el “conjunto de compromiso”. Esta técnica se basa en el concepto de que una alternativa seleccionada debe tener la distancia más corta posible hacia la solución ideal positiva y estar lo más lejos posible respecto de la solución ideal negativa (Yu P. L., 1973; Zeleny M., 1973).

Una solución ideal se define como una colección de niveles ideales en todos los atributos considerados, pudiendo suceder que tal solución normalmente sea inalcanzable o que sea no factible. El vector compuesto por los mejores valores del j -ésimo atributo respecto a todas las alternativas posibles es la llamada solución ideal positiva. En contraposición, la solución ideal negativa es la dada por el vector que contiene las peores puntuaciones alcanzables en los atributos.

3. Aplicación En El Área De Estudio

La estimación del impacto, es uno de los temas relacionados con el cambio climático que más se está investigando en los últimos años, fundamentalmente porque en gran parte las acciones de lucha para atajar el problema vendrán a partir de un mayor conocimiento de los efectos que puedan derivarse del mismo. Por otra parte, si tenemos en cuenta la desigualdad geográfica de la distribución de dichos efectos, vemos que la puesta en relieve de los impactos resulta imprescindible para que las políticas se dirijan a compensar a las zonas mas afectadas.

El área de estudio considerada en el artículo se refiere a los términos municipales, de la comarca de Monegros (Albalatillo, Alberuela de Tubo, Capdesaso, Lalueza, Poleñino y Sariñena), de la provincia de Huesca en la Comunidad Autónoma de Aragón. Esta zona tiene características similares en cuanto a climatología, suelos, prácticas agrícolas y sus recursos hídricos provienen del embalse de la Sotonera y se distribuyen a través del canal de Monegros. La superficie cultivada que abarca el estudio tiene una extensión de 30.305 Ha de las que 23.387 son tierras cultivables en regadío y el resto son de secano.

Tabla 1. Superficie de tipos de suelo en el área de estudio (Ha)

Municipio	S1	S2	S3	S4	Total
<i>Albalatillo</i>	362	5	0	294	662
<i>Alberuela</i>	182	907	249	169	1.507
<i>Capdesaso</i>	677	609	261	4	1.551
<i>Lalueza</i>	2.506	3.376	1.016	224	7.123
<i>Poleñino</i>	1.299	732	87	384	2.502
<i>Sariñena</i>	7.690	2.931	498	5.840	16.960
Total (Ha)	12.716	8.560	2.111	6.915	30.305

Los tipos de suelo agrupados según su capacidad productiva surgen de las categorías determinadas por trabajos hechos para la zona (Nogués, 1994). En esta cartografía de suelos, se aplica el método de evaluación de tierras FAO de 1976 y el valor de índice modificado (Boixadera y otros, 1991), para calcular una escala del potencial productivo de

los suelos estudiados, distinguiendo trece tipos de suelo que han sido agrupados en cuatro categorías (Tabla 1).

La puesta en regadío del área de estudio data de los años 1930 y 1960, y aunque predominaban las zonas planas en toda el área transformada en regadío, se practicaron nivelaciones para aumentar la superficie de regadío (Bolea, 1986). El método de riego más utilizado es el riego por superficie. En este método de riego, el agua se distribuye por gravedad y se infiltra en el suelo, por lo que es necesario un buen diseño de la parcela ya que el caudal va disminuyendo a lo largo de la parcela regada.

3.1. Modelo básico de decisión

En la elaboración de este modelo se ha pretendido emular el ejercicio de decisión que deben hacer los agricultores al planificar su campaña, consistente en asignar recursos a cada cultivo de la explotación. En nuestro caso, por razones de orden práctico consideraremos las explotaciones equivalentes a los términos municipales de cara a la toma de decisiones. A continuación, se presentan de forma esquemática, las variables de decisión empleadas, los objetivos pretendidos por los decisores y las restricciones a que se ven sometidos atendiendo a las restricciones reales existentes en la zona analizada.

Las variables de decisión X_{ij} representan la superficie en producción dedicada al cultivo j en el tipo de suelo i , siendo $X_j = \sum_i x_{ij}$ la superficie dedicada a cada cultivo.

Cultivos: (j=1,...,n) n=9

$X_T = X_1$ Sup. cultivada de trigo
 $X_C = X_2$ Sup. cultivada de cebada
 $X_M = X_3$ Sup. cultivada de maíz
 $X_G = X_4$ Sup. cultivada de girasol
 $X_A = X_5$ Sup. cultivada de alfalfa

$X_Z = X_6$ Sup. cultivada de arroz
 $X_O = X_7$ Sup. destinada a otros cultivos
 $X_R = X_8$ Sup. retirada de cultivo
 $X_B = X_9$ Sup. de barbecho

Tipos de Suelo: S_i ($i=1,...,m$) $m=4$

- S_1 Suelo en regadío de productividad alta
 S_2 Suelo en regadío de productividad media
 S_3 Suelo en regadío de productividad baja
 S_4 Suelo en secano

La tabla 2 muestra con detalle la descripción de estas variables:

Tabla 2. Variables de Decisión

Cultivos Suelos		Trigo X_1	Cebada X_2	Maíz X_3	Girasol X_4	Alfalfa X_5	Arroz X_6	Otros X_7	Ret./PAC X_8	Barbecho X_9
Regadío	S_1	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	X_{18}	-
	S_2	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{26}	X_{27}	X_{28}	-
	S_3	X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{34}	X_{35}	X_{36}	X_{37}	X_{38}	-
Secano	S_4	X_{41}	X_{42}	-	-	-	-	X_{47}	X_{48}	X_{49}
Total	S_d	X_T	X_C	X_M	X_G	X_A	X_Z	X_O	X_R	X_B

Los objetivos se calculan con las ecuaciones:

$$[\text{Margen Neto}] \quad Z_1(X) = \sum_{j=1}^9 \sum_{i=1}^4 m_{ij} x_{ij}$$

$$[\text{Riesgo}] \quad Z_2(X) = \vec{X}^T R \vec{X}$$

Donde:

- m_{ij} Margen neto para cada cultivo en cada tipo de suelo.
 R Matriz de varianzas y covarianzas de los márgenes netos.
 $\vec{X}$ Vector de distribución de los cultivo elegidos.
 h_{ij} Consumo de agua por cultivo y tipo de suelo (m^3/Ha).
 H Disponibilidad de agua.

Las Restricciones del modelo vienen medidas por las ecuaciones:

$$[\text{Sucesión}] \quad x_{ij} \leq \sum_{j \in I_j} s_j x_{ij} \quad i=1,...,m \quad j=1,...,n$$

$$\text{[Frecuencia]} \quad x_{ij} \leq \frac{M_j}{M_j + N_j} S_i \quad i=1, \dots, m \quad j=1, \dots, n$$

$$\text{[PAC]} \quad x_{iR} \leq \sum_j r_{ij} x_{ij} \quad i=1, \dots, m \quad j=8$$

$$\text{[Barbecho]} \quad x_{49} \leq I_B \sum_{j \in Ich} x_{4j}$$

$$\text{[Tierra]} \quad \sum_j x_{ij} \leq S_i \quad i=1, \dots, m$$

$$\text{[Mano de obra]} \quad MO_t = \sum_{ij} o_{ijt} x_{ij} \quad \forall t \quad MO_t = \sum_j o_j x_j$$

$$MO_{it} = \sum_j o_{ij} x_{ij} \quad i=1, \dots, m \quad t=1, \dots, T$$

$$MO_t = \sum_p MO_{it}$$

$$MO = \sum_t \sum_i \sum_j o_{ijt} x_{ij}$$

$$\text{[Agua]} \quad H_{it} = \sum_j h_{ijt} x_{ij} \quad i=1, \dots, m \quad t=1, \dots, T$$

$$t \in I_H$$

$$H_t = \sum_i H_{it} \quad H = \sum_t H_t$$

$$H_{it} = \sum_t \sum_i \sum_j h_{ijt} x_{ij}$$

Donde:

s_j Coeficiente de sucesión de cada cultivo.

I_j Conjunto de los cultivos que pueden preceder.

M Tiempo que una parcela permanece ocupada por un cultivo determinado.

N Tiempo que debe pasar para que un cultivo pueda volver a una parcela.

r_{ij} Índice de retirada de cada cultivo.

I_B Umbral de la superficie que se deja en barbecho expresado en porcentaje.

I_{ch}	Superficie total destinada a cultivos herbáceos.
S_i	Superficie cada tipo de suelo.
MO_t	Mano de obra requerida en el periodo t .
MO_{it}	Mano de obra requerida por el suelo i en el periodo t .
MO	Mano de obra total requerida.
o_{ijt}	Mano de obra requerida por cultivo j y tipo de suelo i en el periodo t .
H_t	Agua requerida en el periodo t .
H_{it}	Agua requerida por el suelo i en el periodo t .
H	Agua total requerida por los cultivos.
h_{ijt}	Agua requerida por el cultivo j y tipo de suelo i en el periodo t .

Las *restricciones de sucesión* obedecen a la necesidad de respetar unas reglas de rotación agronómicas que limitan el tipo de cultivos que pueden suceder a uno determinado para evitar la proliferación de plagas y enfermedades. Las reglas de sucesión establecen que la superficie de un cultivo debe ser menor o igual a la superficie de otros cultivos precedentes admisibles, esto se incorpora al modelo a través de los coeficientes de sucesión.

Las *restricciones de frecuencia* se incorporan para cubrir la necesidad de evitar el agotamiento del suelo, y por ello establecen un tiempo en el que un mismo cultivo no debe ser establecido en una misma parcela.

Las *restricciones de la PAC* son las que exigen a los agricultores dejar sin cultivar parte de la superficie de sus explotaciones, como condición para percibir determinadas ayudas.

Las *restricciones de barbecho* representan una práctica habitual que se lleva a cabo en suelos de secano y significan dejar de cultivar una parcela un periodo de tiempo mas o menos prolongado incorporado con el índice de barbecho.

Las *restricciones de tierra disponible* representan la limitación de las superficies destinadas al cultivo en los diferentes tipos de suelo, que no podrán ser superiores a las disponibles en los distintos términos municipales.

Las *restricciones de mano de obra* son las que limitan las superficies de cultivos a la disponibilidad de mano de obra disponible en cada término municipal.

Las *restricciones de agua* son las que limitan las superficies de cultivos a la disponibilidad de agua asignada en cada término municipal.

Una vez definidas las restricciones, se construye la matriz de pagos que nos permite cuantificar el nivel de conflicto existente entre los distintos objetivos. Para su cálculo se optimiza cada objetivo separadamente y se calculan a continuación los valores de los demás objetivos en cada solución óptima. Cada elemento de la diagonal principal se denomina “punto ideal”, esto es, la solución en que el margen neto y el riesgo alcanzan su valor óptimo. El peor elemento de cada columna de la matriz de pagos es el “punto anti-ideal”. Así en nuestro modelo el punto anti-ideal corresponde al mínimo margen neto y el máximo riesgo.

Tabla 3. Matriz de Pagos

	Margen Neto (Euros / ha)	Riesgo Euros
Margen Neto	11.221.562	10.099.406
Riesgo	355.478.662.326	77.580.169.913

Dos objetivos son considerados como parte del proceso de decisión de los agricultores. Estos tratan de reflejar las inquietudes que consideramos mas relevantes de los agricultores de la zona en la toma de decisiones. Los objetivos buscan por una parte Maximizar el Margen Neto y por otra Minimizar el riesgo. La elección del margen neto, en lugar del margen bruto, para el primer objetivo se debe a que disponemos de datos de costes fiables que permiten mejorar el trabajo. El objetivo de minimizar el riesgo, se justifica debido a que la variabilidad de las condiciones climáticas en que se llevan a cabo los cultivos, aconsejan considerar este objetivo como prioritario en el proceso de decisión.

El problema de optimización se expresa como sigue:

$$\text{Min} \left[\sum_{j=1}^2 \left(w_j \frac{|z_1 w_1 - z_1^*|}{z_{pt}^0 - z_1^0} \right)^p \right]^{1/p} \quad z^* = (z_1^*, z_2^*)$$

Para $p =$, se minimiza la máxima desviación de entre todas las desviaciones individuales

$$\text{Min } d(z, z^*)$$

Una vez contruidos los escenarios, estos deben simularse para los distintos niveles de CO₂, en el artículo se plantean así:

1xCO₂: Es el escenario base o de referencia que nos sirve para comparar con los demás escenarios.

2xCO₂: Es el escenario construido con las productividades de los cultivos obtenidos con los datos de clima modificado por doble concentración de dióxido de carbono.

Por último, para validar el modelo, se comparan las carteras de cultivos asignada por el modelo para cada término municipal con la información estadística existente para la zona en las campañas consideradas. La validación, se ha realizado 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, términos municipales y conjunto de la comarca, y por tipo de suelo. Los resultados obtenidos en cada municipio se aproximan a las superficies de referencia, si bien la aproximación varía por municipios.

Tabla 4. Validación del modelo superficies asignadas respecto al plan real

	Modelo	Plan real	Error	Diferencia
Trigo	169,7	117,0	52,7	45%
Cebada	1390,4	1028,0	362,4	35%
Maíz	6441,5	5763,0	678,5	12%
Girasol	2064,7	1357,0	707,7	52%
Alfalfa	3961,5	5605,0	-1643,5	-29%
Arroz	1626,0	1538,0	88,0	6%
PAC	1087,8	1338,0	-250,2	-19%
Tr. Secano	382,0	313,0	69,0	22%
Ce. Secano	796,9	612,0	184,9	30%
Barbecho	1002,4	788,0	214,4	27%
Otros cultivos	4581,1	5045,0	-463,9	-9%
Total (Ha)	23504	23504	0,0	

La tabla 4 muestra las superficies asignadas por el modelo para los diferentes cultivos y las superficies del plan real tomado como referencia. De la comparación de ambos surgen las diferencias que reflejan la existencia de una buena aproximación del modelo a la realidad, esto permite su utilización en los diferentes escenarios presentados en este artículo. Las diferencias observadas pueden explicarse por las limitaciones del modelo, que no recoge en las funciones objetivo o en las restricciones criterios importantes de decisión para los agricultores.

3.2 Datos

El modelo se ha construido usando información técnica y económica de la zona analizada. Los datos de costes provienen de publicaciones oficiales de la Diputación General de Aragón (DGA) y están agrupados en costes directos, maquinaria, mano de obra, costes indirectos y amortizaciones. Las superficies de cultivos se calculan a partir de los cuestionarios 1T de las bases de datos municipales de la provincia de Huesca, que dan origen a las estadísticas de la DGA. Los coeficientes técnicos de la función objetivo han sido definidos de manera precisa, así los rendimientos son el resultado de la combinación de fuentes estadísticas, experimentos de campo, y los obtenidos del modelo de simulación de cultivos EPIC. Este modelo requiere información de suelos, clima, coeficientes genéticos de las especies cultivadas y las prácticas de manejo habituales en cada cultivo. Los datos climáticos de un equivalente a doble concentración de dióxido de carbono ($2\times\text{CO}_2$) provienen de los Modelos de Circulación General (MCG): Goddard Institute for Space Studies (GISS) Canadian Climate Center Model (CCCM) Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)

Los coeficientes de mano de obra para cada actividad se han calculado a partir de los requerimientos horarios de maquinaria y mano de obra, empleando para ello publicaciones oficiales de actividades agrarias y boletines técnicos. Las cifras de agua de riego han sido calculadas a partir de las necesidades netas de los cultivos dependientes de los datos meteorológicos. Posteriormente, la eficiencia de riego ha sido determinada para cada

sistema de riego y tipo de suelo. Finalmente las necesidades de riego surgen del producto de las necesidades netas del cultivo por la inversa de la eficiencia.

Los coeficientes de sucesión, frecuencia, políticas agrarias y empleo de recursos se han definido después de una amplia exploración sobre las condiciones agronómicas, fechas de siembra, fechas de recolección, periodos de cultivos y de barbecho. Así como las condiciones de manejo y mano de obra para cada cultivo.

4. Resultados

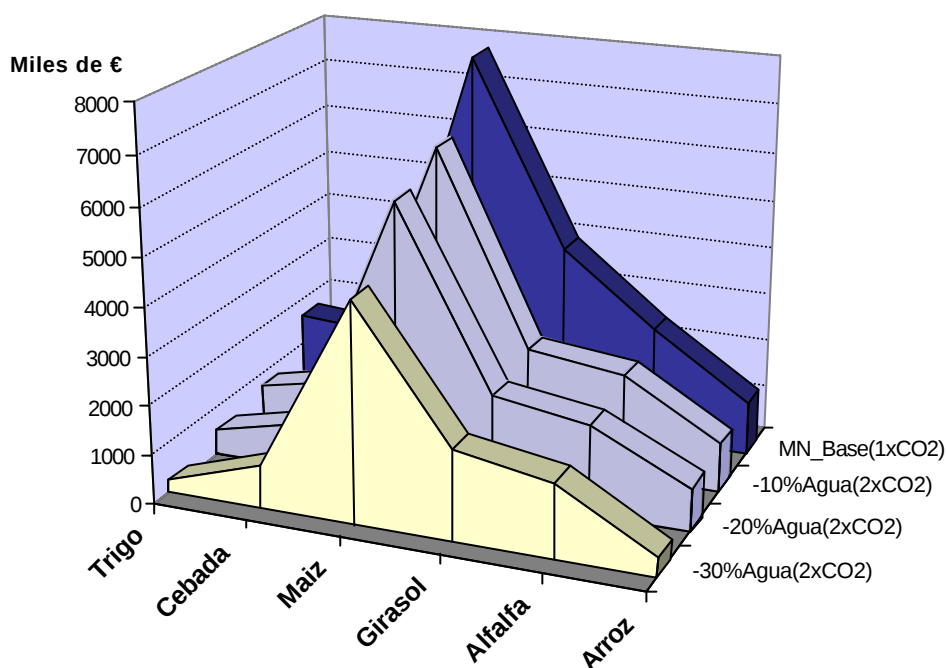
Después de planteados los distintos modelos de simulación para cada escenario, éstos han sido resueltos obteniéndose como resultado el plan de cultivo elegido por los agricultores en cada caso. Además, los modelos han establecido el valor de los atributos de especial relevancia para el análisis del uso de factores y su evolución en los diferentes escenarios.

Para una mejor comprensión de los resultados obtenidos en las simulaciones, es necesario aclarar los supuestos en los que se sustenta el modelo y así reconocer las limitaciones del mismo. En primer lugar, se considera que los precios percibidos por los agricultores son iguales a los percibidos en el escenario de referencia. Esta simplificación del problema ignora las oscilaciones de los mercados agrarios, lo que hace que se consideren de forma neutra las perspectivas de futuro. Por otra parte, se considera que los costes variables, permanecen constantes en los diferentes casos, esto permite poner de relieve los factores de análisis que interesan como punto de partida para la simulación. Finalmente, los cambios tecnológicos no son tenidos en cuenta, considerándose un modelo de decisión a corto plazo y en todo caso como instrumento de medida de impacto del cambio climático.

El grafico 1, muestra los resultados obtenidos en los diferentes escenarios, en estos cabe destacar la importante reducción de los márgenes netos que se observa si comparamos los planes de cultivo del año base considerados como referencia, con los diferentes escenarios de cambio climático con diferentes niveles de reducción en la disponibilidad de agua. Se ve

claramente que ningunos de los escenarios de cambio climático logra los niveles de beneficio del escenario de referencia.

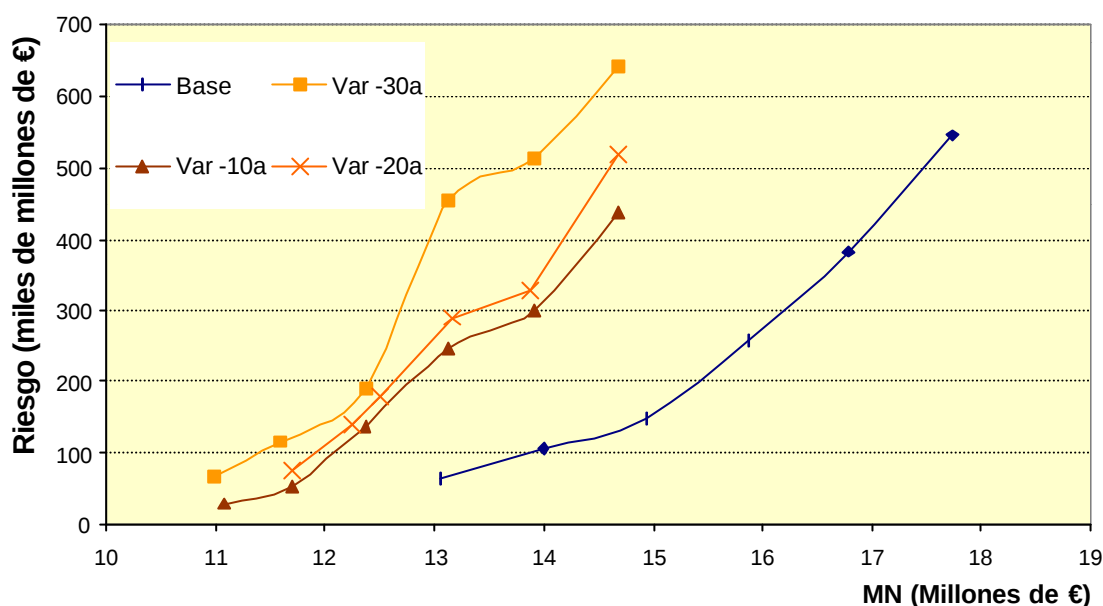
Gráfico 1. Margen Neto del año Base y con 2xCO₂ por Cultivos



La producción conseguida por la simulación de cultivos, con los datos de clima modificado por 2xCO₂ y con escenarios de disponibilidad de agua reducida en diferentes porcentajes (10%, 20% y 30%) han mostrado caídas en los productos obtenidos por unidad de superficie y en consecuencia, menores valores de margen neto para los diferentes escenarios respecto al año base y al mismo tiempo un menor empleo global de recursos.

Al examinar las opciones que tienen los agricultores para asignar los recursos disponibles a distintas actividades de cultivo, el riesgo ocupa un lugar cada vez mas preponderante, en nuestro caso éste ha sido incluido como un objetivo a alcanzar, expresado a través de la varianza en el Margen Neto de las explotaciones agrarias.

Gráfico 2. Fronteras de Riesgo en relación al Margen Neto

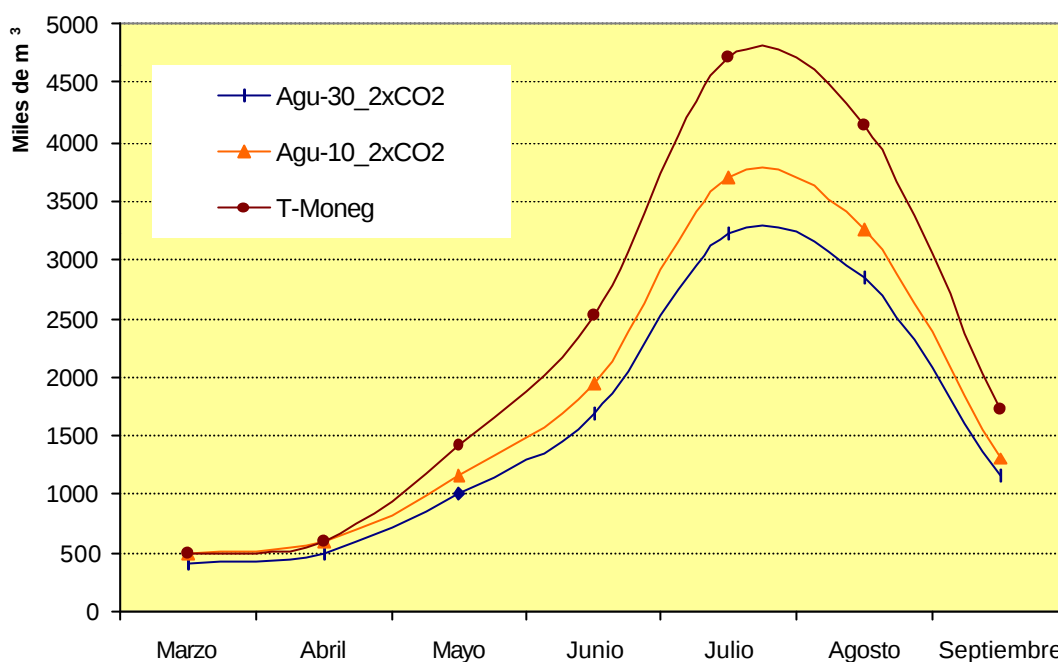


El gráfico 2 muestra las fronteras que representan el máximo margen neto en relación con los diferentes niveles de riesgo expresados como la varianza de los beneficios esperados por los agricultores. Al comparar dichas fronteras, vemos que los valores de riesgo alcanzados por los escenarios de cambio climático son mayores para conseguir equivalentes valores de margen neto.

Por su parte, en lo que respecta al agua de riego, su volumen global se ve reducido como muestra el gráfico 3. Sin embargo, el volumen por hectárea requerido por los diferentes cultivos simulados se incrementa de forma notoria en los escenarios de cambio climático.

En lo que respecta al impacto económico del cambio climático, además de las caídas de margen neto, cabe añadir los mayores costes derivados del incremento de los ratios de consumo de agua respecto a la unidad de margen neto.

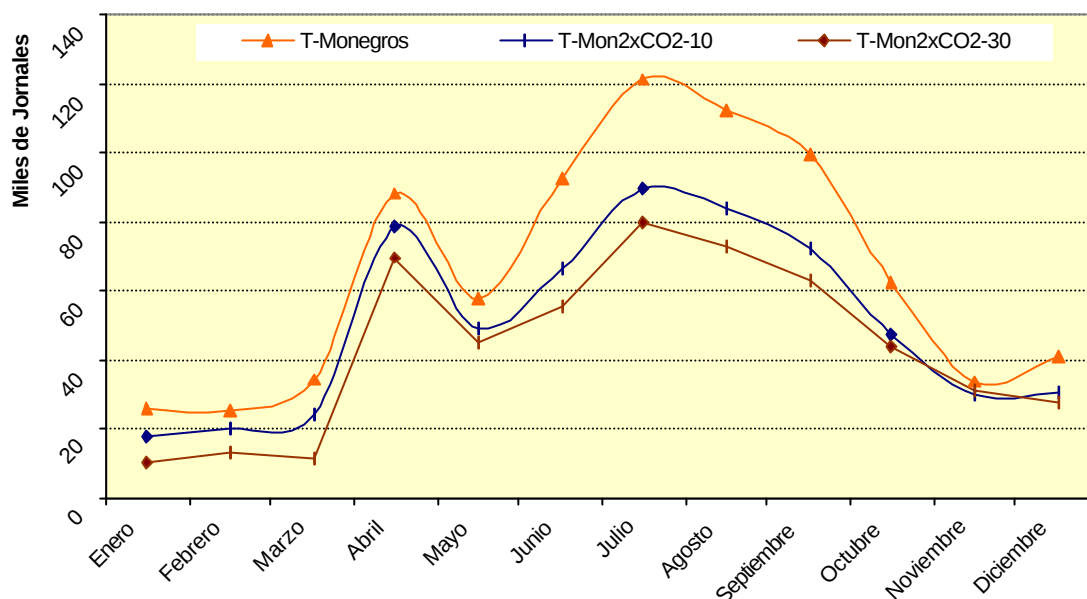
Gráfico 3. Uso de agua de riego en escenario base y 2xCO₂ en los meses críticos



Los impactos que en el aspecto social pueden preverse a la vista de los resultados coinciden con los adelantados por los apuntados en los informes del Grupo de Trabajo II del IPCC en el que se hace referencia a la vulnerabilidad de la viabilidad de las explotaciones en determinadas regiones que por otra parte se ven acosadas por las permanentes reformas de la PAC.

En el gráfico 4 se observa que el impacto sobre el empleo de mano de obra en los escenarios de cambio climático, afecta negativamente al número de jornales empleados. Además, se producen cambios en el empleo agrario como consecuencia de la alteración de los calendarios de las prácticas agrícolas, en los que la mayor parte de las labores ven anticipada su fecha de realización debido al desarrollo acelerado de los cultivos.

Gráfico 4. Mano de obra empleada en los diferentes escenarios



5. Conclusiones

En este trabajo se ha elaborado un modelo que representa las actividades de cultivo del regadío y secano en una serie de explotaciones agrarias y posteriormente ha sido aplicado a una zona de estudio (Monegros). La información agronómica, climática, económica y de política agraria se incluye en este modelo mediante diferentes restricciones de superficie, sucesión de cultivos, frecuencia de cultivos, limitaciones hídricas y de mano de obra, así como variables de política agraria. El modelo se utiliza para examinar el impacto sobre las actividades de cultivo ante el fenómeno del cambio climático, en las variables económicas, de política agraria, y de disponibilidad de recursos, sin embargo en este artículo sólo se ha puesto el énfasis en el efecto del cambio climático y el agua en la marginalización de los cultivos.

A lo largo del trabajo se han examinado las opciones que tienen los agricultores para asignar los recursos disponibles a distintas actividades de cultivo. El modelo maximiza el margen neto y minimiza el riesgo, expresado a través de la menor varianza en el margen neto de las explotaciones agrarias. Planteado de este modo, ha sido utilizado como

herramienta de análisis para evaluar la respuesta de los cultivos ante diferentes escenarios de disponibilidad de recursos, y políticas hídricas y medioambientales.

La información sobre los suelos y las superficies de cultivos se han determinado mediante la elaboración de los datos de los cuestionarios 1T, del mapa de suelos y del mapa de municipios. La información económica, para el cálculo del margen neto de los cultivos, se ha obtenido a partir de fuentes de datos de costes, de precios de mercado, de subvenciones de la PAC, y de producciones de la zona. Las producciones se han elaborado utilizando rendimientos calculados con el programa de simulación de cultivos EPIC y estimaciones estadísticas de producción.

Mediante los diferentes escenarios se ha observado el comportamiento de los agricultores frente a los efectos adversos del cambio climático, distintas políticas hidráulicas expresadas como recortes en la disponibilidad de agua, y los comportamientos observados sirven para trazar un perfil conductual de los gestores de las explotaciones agrarias.

Una importante conclusión que podemos extraer del trabajo es relativa a la metodología empleada. A este respecto debemos decir que ésta se ha mostrado como un instrumento válido para medir los impactos del cambio climático tanto a nivel de explotaciones como en áreas mas extensas. Esta utilidad de la metodología, tiene una consecuencia inmediata que permite discriminar entre, los pobres resultados económicos debidos a una mala gestión de las explotaciones agrarias, de otros que se derivan de unas condiciones mas restrictivas debidas a la incidencia del cambio climático en los factores productivos agrarios.

Otra conclusión importante que se puede extraer del trabajo es que existe una paulatina pérdida de potencialidad productiva en las explotaciones de la región estudiada. Dicha apreciación y su consiguiente vinculación al cambio climático, sólo es posible poner de manifiesto a través de un análisis metodológico multidisciplinar como el que exponemos en este artículo.

En el aspecto social, el efecto que se observa en los escenarios de cambio climático sobre la mano de obra, tiene dos elementos a destacar, por una parte la incidencia negativa

observada al reducirse considerablemente el número de jornales ocupados, mientras que por otra parte se produce también una alteración del calendario previsto para los trabajos que además ven reducido su plazo de ejecución.

Finalmente, la metodología presentada en este artículo, puede ser de mucho valor para la evaluación de políticas de lucha y prevención de los impactos del cambio climático en el sector agrario. Este hecho, adquiere relevancia si tenemos en cuenta que la PAC no es favorable a incrementos presupuestarios para sostener explotaciones agrarias poco eficientes, mientras que las políticas ambientales tienen un mejor tratamiento en los presupuestos de la UE. En este sentido la zona de estudio, debería ser tomada en cuenta, no solo por su condición de zona de producción marginal, sino como región afectada negativamente por el cambio climático.

6. Bibliografía

- Amador, F.; Sumpsi, J.M. y Romero, C. (1998): "A Non-interactive Methodology to Assess Farmers' Utility Functions: An Application to Large Farms in Andalusia, Spain". *European Review of Agricultural Economics*, 25: 95-109.
- Ayala-Carcedo, F.J. (1996). Reducción de los recursos hídricos en España por el posible Cambio Climático. Tecnoambiente, Madrid, septiembre.
- Berbel Vecino, J., Cañas Madueño, J.A., Gómez-Limón Rodríguez, J.A., López Baldovin, M.J. y Arriaza Balmón, M. (1999). Micromodelos de Gestión de Agua de Riego. Análisis del Impacto Socioeconómico y Ambiental de una Política de Precios. Ayuntamiento de Córdoba, Concejalía Medio Ambiente. I.S.B.N. 84-88423-11-X.
- Bell M. L., Hobbs B. F., Elliot, E. M. (1998) An evaluation of Multicriteria Decision-Making Methods in integrated assessment of climate policy. Editors: Haimes Y.Y. and Steuer. *Research and Practice in Multicriteria Decision Making. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*.
- Bocco, M.; S. Sayago; E. Tártara (2000). Elección de alternativas productivas en explotaciones hortícolas Modelización a partir de la Programación Multiobjetivo. *Investigación Agraria, Producción y Protección Vegetal*. Vol. 15 (1-2), 2000

- Boixadera J., Porta J. (1991). Información de suelos y evaluación catastral. Método del valor índice. Centro de Gestión Catastral y Cooperación Tributaria. Ministerio de Economía y Hacienda. Madrid
- EPIC (1990). Environmental Policy Impact Calculator (Erosion Productivity Impact Calculator) US Department of Agriculture, Agricultural Research Service Grassland, Soil and Water Research Laboratory. Blackland. Temple TX-USA.
- Feijóo M. L, Calvo E., Albiac J. (2000) Economic and Environmental Policy Analysis of the Flumen-Monegros Irrigation System in Huesca, Spain. Geographical Analysis. Vol. 32 N°3.
- Gómez-Limón J. A. (2002) La reforma de la PAC y la aplicación de la Directiva Marco de Agua: Repercusiones sobre la agricultura de regadío. Estudios de Economía Aplicada. Vol. 20-I, 2002. Pág. 155-195.
- Hazell P., Norton R. (1986). Mathematical programming for economic analysis in agriculture. Macmillan. New York.
- IPCC, (1990) Informe Grupo de Trabajo N° II.
- IPCC, Informe WGII, (1992) Cambio Climático. Evaluación de Impactos del IPCC.
- IPCC, (2001) Report of WGII, Climate Change 2001. Impacts, Adaptations and Vulnerability Evaluación de Impactos del IPCC.
- IPCC, (1994). Climate Change 1994. Radioactive Forcing of Climate Change and An Evaluation of IS92 Emission Scenarios.
- IPCC, Informe WGII, (1996) “Cambio Climático. Evaluación de Impactos del IPCC”.
- IPCC, (2001). Report of the Seventeen Session of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Nairobi April 2001.
- Nogués J. (1994). Evaluación de tierras mediante la aplicación del método FAO -1976 y su integración un sistema de información territorial en las 26000 has (sectores IV al XI) regadas por el canal del Flumen (Huesca). ETSEA de Lérida, Lérida
- Orús F., Quílez, D., y Betrán, J, (2000). El Código de Buenas Prácticas Agrarias (I). Fertilización nitrogenada y contaminación por nitratos. Edita: Diputación General de Aragón. Dirección General de Tecnología Agraria.
- Romero, C. (1993). Teoría de la decisión multicriterio: conceptos, técnicas y aplicaciones, Alianza Editorial Textos.
- Stratus Consulting Inc (1999). Compendium of Decision Tools to Evaluate Strategies for Adaptation to Climate Change UNFCCC Secretariat Bonn, Germany.

- Tietenberg, T, (1992) Environmental and Natural Resource Economics 3rd Edition Harper Collins Publishers
- WWF, (2001). Fondo Mundial para la Naturaleza. Elementos de buena práctica en la gestión integrada de cuencas hidrográficas. Un documento de consulta para la aplicación de la Directiva marco del agua de la UE Bruselas, Bélgica.
- Yu P. L. (1973): A class of solution for group decision problems. Management Science, 19,936-946.
- Zeleny M. (1973): Compromise programming. In: Multicriteria decision making, Cochrane J.L. and Zeleny M (Eds.) University of South Carolina Press, Columbia, pp 262-301.