

SILVERIO ALARCÓN (*)

La programación estocástica discreta como instrumento de planificación de plantaciones de olivos en Castilla-La Mancha

1. INTRODUCCIÓN

Desde principios de la década de los 90 se ha asistido en muchas regiones de España (Andalucía, Extremadura, Castilla-La Mancha, y Cataluña, principalmente) a una gran actividad en torno al olivar: nuevas plantaciones en secano y regadío, aumento de la densidad de plantación, transformaciones en regadío de muchos olivares de secano, etc. Es evidente que esto ocurre porque el olivar es un cultivo rentable. Pero si se tiene en cuenta que el olivo es un cultivo a largo plazo con fuertes inversiones al inicio de la plantación y un período improductivo considerable, quizá sea más acertado expresar la afirmación anterior diciendo que el aumento de la superficie de olivar se debe a que muchos agricultores perciben la situación futura del olivar como favorable. En otras palabras, están dispuestos a realizar estas inversiones y a renunciar a los flujos de caja que obtendrían con cultivos herbáceos porque confían en unos buenos escenarios económicos y políticos para el olivar.

En este trabajo se muestra cómo la programación estocástica discreta es una técnica útil para plantear problemas decisionales de este tipo.

(*) Dpto. de Economía y Ciencias Sociales Agrarias. Universidad Politécnica de Madrid.

Antes de realizar este análisis, se ha considerado interesante señalar algunas características de la situación del olivar, con una especial referencia a Castilla-La Mancha que es la región donde se realiza la aplicación.

Luchetti (1996) señala que el 96 por ciento del olivar mundial está situado en los países mediterráneos y que se caracteriza por unas condiciones productivas peores que las de otros cultivos frutales. Es decir, deficientes cuidados culturales, escasa mecanización, suelos pobres, parcelas pequeñas, plantaciones viejas, etc.

Según Humanes (1996) la superficie de olivar en España pasó de un millón de hectáreas a principios de siglo a 2,3 millones de hectáreas en 1965. En la década de los 70, sin embargo, se produjo una fuerte disminución de esta superficie como consecuencia del aumento del consumo de otros aceites vegetales, principalmente el de girasol. En 1994 la superficie total olivar en España era de 2.177.330 ha, de las que 2.047.346 ha correspondían a olivar de aceituna de almazara. Sumpsi, Barceló (1996, p. 222) describen la recuperación del olivar de los últimos años de esta forma:

«La superficie olivarera descendió a principios de los 80, arrancándose olivos de baja rentabilidad y difícil explotación, en terrenos pobres, para cultivar cereal y girasol principalmente. Pero en estos últimos años irrumpe un nuevo período de esplendor. A pesar de las ayudas compensatorias, los precios de los cereales y del girasol apenas compensan la dedicación al cultivo de éstas y otras especies herbáceas tradicionales de nuestros secanos; y tampoco compensa la mayoría del viñedo. Y se vuelve al olivar, replantándose aquellos terrenos sometidos a arranques hace sólo diez años. Además, de momento, la ayuda a la producción y al consumo, así como otras medidas comunitarias, han creado una situación actual favorable que invita a plantar olivos y a invertir en la modernización de los procesos extractivos de aceite de oliva».

Por su parte Civantos (1995) estima que aproximadamente el 10 por ciento de las explotaciones agrarias españolas se dedican al cultivo del olivar y generan alrededor de 25 millones de jornadas de trabajo y una producción oleícola que supone en torno al 10 por ciento de la producción final vegetal.

Aproximadamente el 70 por ciento del olivar de Castilla-La Mancha se encuentra en las provincias de Toledo y Ciudad-Real. El cuadro 1 recoge los porcentajes de cada cultivo con respecto a la tierra de secano en la provincia de Toledo. Se aprecia como el principal aprovechamiento son los cultivos herbáceos (43 por ciento) y dentro de ellos destacan los cereales. La superficie que aparece como barbecho y que representa una alta proporción del secano (26,31 por ciento) también se puede considerar como tierra dedicada a cultivos anuales. El resto de la superficie labrada corresponde a cultivos leñosos tales como el viñedo (19,52 por ciento) y el olivar (10,89 por ciento). «La Mancha» es la comarca con mayor superficie dedicada al olivar (31.767 ha), seguida de «La Jara» (15.439 ha) y «Sagra-Toledo» (14.322 ha). Sin embargo, en otras comarcas de menores dimensiones el olivar tiene una participación considerable en las tierras de secano, como son «Montes de Navahermosa» (19,14 por ciento) y «Montes de los Yébenes» (12,03 por ciento).

En términos relativos la proporción de superficie de secano dedicada al olivar es en Ciudad-Real (cuadro 2) similar a la de Toledo (10,98 por ciento). Por comarcas y en cifras absolutas destacan «Campo de Montiel» (19.615 ha), «Montes Norte» (18.404 ha) y «Campo de Calatrava» (17.791 ha), si bien en otras zonas como «Montes Sur» y «Pastos» el olivar es también un cultivo importante que representa en torno al 13 por ciento de la superficie de secano.

Cuadro 1

APROVECHAMIENTOS AGRÍCOLAS EN LAS COMARCAS DE TOLEDO
(porcentaje sobre tierra labrada de secano)

	Cereales secano	Legum. secano	Forraj. secano	Indust. secano	Barbecho secano	Olivar secano	Viñedo secano	Frutales secano
Prov. Toledo	39%	1,35%	1,59%	0,85%	26,31%	10,89%	19,52%	0,51%
Talavera	48%	0,77%	4,17%	0,18%	36,65%	7,42%	2,56%	1,41%
Torrijos	44%	0,79%	2,38%	2,18%	28,16%	6,58%	15,01%	0,52%
Sagra-Toledo	44%	1,64%	1,67%	0,29%	31,82%	13,06%	7,27%	0,16%
La Jara	39%	0,57%	0,47%	0,00%	33,50%	24,39%	0,29%	1,51%
M. Navahermosa	38%	0,17%	11,97%	0,00%	23,52%	19,14%	5,59%	1,53%
M. Yébenes	49%	0,66%	1,43%	0,31%	26,54%	12,03%	9,39%	1,14%
La Mancha	32%	1,92%	0,22%	1,06%	20,32%	9,22%	35,05%	0,05%

Fuente: Elaboración propia a partir del Censo Agrario 1989.

Cuadro 2

APROVECHAMIENTOS AGRÍCOLAS EN LAS COMARCAS DE CIUDAD-REAL
(porcentaje sobre tierra labrada de secano)

	Cereales secano	Legum. secano	Forraj. secano	Indust. secano	Barbecho secano	Olivar secano	Viñedo secano	Frutales secano
Prov. Ciudad-Real .	39%	0,34%	0,88%	0,49%	24,58%	10,98%	23,66%	0,30%
Montes Norte	46%	0,06%	3,27%	0,26%	28,30%	18,68%	2,80%	0,34%
C. de Calatrava.....	49%	0,45%	0,91%	0,92%	25,35%	11,97%	10,91%	0,34%
Mancha.....	24%	0,26%	0,30%	0,09%	17,47%	5,18%	52,59%	0,08%
Montes Sur	42%	0,01%	0,90%	0,00%	42,54%	13,81%	0,36%	0,13%
Pastos	50%	0,02%	0,64%	0,15%	35,58%	13,03%	1,05%	0,06%
Campo Montiel	42%	0,80%	0,38%	1,18%	25,02%	13,33%	16,17%	0,77%

Fuente: Elaboración propia a partir del Censo Agrario 1989.

De la Puerta (1996) señala algunas características y deficiencias del olivar en Castilla-La Mancha:

- Baja densidad de plantación y olivos de varios pies que dificultan el mantenimiento de una buena relación hoja/madera,
- Podas de renovación habituales y severas que originan quemaduras del sol en ramas y troncos,
- Rendimientos bajos comprendidos entre 500 kg y 1.000 kg,
- Predomina la variedad Cornicabra que produce un aceite de buena calidad y de características uniformes con una buena demanda por parte de compradores italianos y catalanes.

Otros autores señalan que el olivar en Castilla La-Mancha es un cultivo marginal con deficiencias pero que produce un aceite de oliva de calidad con una buena aceptación en el mercado y con una demanda creciente. Desde un punto de vista ecológico, además, el olivar es un cultivo que puede frenar procesos erosivos y de degradación de suelos. La planificación de plantaciones de olivos es, por tanto, un problema interesante y como en muchos otros casos de planificación de la producción surgen interrogantes tales como: ¿inversiones escalonadas o instantáneas?, ¿en qué tierras es aconsejable plantar y en qué cantidad?, ¿qué efectos sobre la rentabilidad producirían distintas medidas de política agraria?, ¿qué sistema de recolección es mejor utilizar?, etc. Es difícil responder a

estas preguntas de forma intuitiva. Los modelos de programación matemática tampoco las resuelven de una forma definitiva pero sí aportan una información que puede servir de gran ayuda la hora de tomar decisiones. Este es precisamente el objetivo de este trabajo: modelizar situaciones de incertidumbre mediante programación estocástica discreta para mostrar la utilidad de esta herramienta en tareas de asesoramiento a los agricultores y de análisis de políticas agrarias. En concreto, se determinan las parcelas en las que es rentable plantar y las secuencias de plantaciones recomendables, así como su sensibilidad al grado de aversión al riesgo del empresario, a los costes de la mano de obra, a la mecanización y a las ayudas al establecimiento de plantaciones. Para ello, en la sección dos se presenta una adaptación de los modelos multiperíodo a un problema general de planificación de cultivos plurianuales. La sección tres muestra cómo mejorar los modelos anteriores introduciendo la incertidumbre con respecto a algunos parámetros y formulando una programación estocástica discreta. En la sección cuatro se detallan aspectos particulares de la aplicación a explotaciones de la comarca Campo de Montiel (Ciudad-Real), y en la cinco y seis se resumen los resultados obtenidos y las conclusiones, respectivamente.

2. MODELOS MULTIPERÍODO PARA LA PLANIFICACIÓN DE ACTIVIDADES AGRARIAS A LARGO PLAZO

Los modelos multiperíodo de programación matemática son formulaciones que incluyen actividades económicas anuales y plurianuales. Las primeras suelen ser tareas con escasas repercusiones económicas en períodos productivos posteriores. Las actividades plurianuales, sin embargo, se caracterizan por su capacidad para modificar las condiciones técnicas o económicas de las actividades de períodos posteriores. Entre ellas están las inversiones en factores productivos fijos, como maquinaria, instalaciones, transformaciones en regadío, y la realización de actividades productivas con vida útil superior a una campaña, como plantaciones frutales, ganado, etc.

El planteamiento multiperíodo busca planificar la actividad productiva de un conjunto de períodos de tiempo y esto incluye determinar la combinación de inversiones o estrategia

de expansión que maximiza una función objetivo dada (Hazzell, Norton, 1986, Rae, 1994).

Un modelo para estudiar inversiones en cultivos plurianuales se puede especificar como:

$$\text{Max } f(X_{ht}, X_{jt})$$

sujeto a:

$$\begin{aligned} \sum_{h=1}^H a_{ih1} X_{h1} + \sum_{j=1}^J a_{ij} X_{jt} &\leq b_i \quad \forall i \\ \sum_{h=1}^H a_{ih2} X_{h1} + \sum_{h=1}^H a_{ih1} X_{h2} + \sum_{j=1}^J a_{ij} X_{jt} &\leq b_i \quad \forall i \\ \sum_{h=1}^H a_{ih3} X_{h1} + \sum_{h=1}^H a_{ih2} X_{h2} + \sum_{h=1}^H a_{ih1} X_{h3} + \sum_{j=1}^J a_{ij} X_{jt} &\leq b_i \quad \forall i \\ \vdots &\vdots \\ \sum_{h=1}^H a_{iht} X_{h1} + \sum_{h=1}^H a_{ih(t-1)} X_{h2} + \sum_{h=1}^H a_{ih(t-2)} X_{h3} + \dots + \sum_{h=1}^H a_{ih1} X_{ht} + \sum_{j=1}^J a_{ij} X_{jt} &\leq b_i \quad \forall i \\ \vdots &\vdots \\ \sum_{h=1}^H a_{ihT} X_{h1} + \sum_{h=1}^H a_{ih(T-1)} X_{h2} + \sum_{h=1}^H a_{ih(T-2)} X_{h3} + \dots + \sum_{h=1}^H a_{ih(T-t)} X_{ht} + \dots + \sum_{j=1}^J a_{ij} X_{jT} &\leq b_i \quad \forall i \\ X_{ht} \geq 0, X_{jt} \geq 0 & \end{aligned} \quad [1]$$

donde las variables X_{jt} indican el nivel de realización de los cultivos herbáceos (cultivo j en el año t) y las variables X_{ht} representan la decisión de plantar el cultivo plurianual h en el año t y, por tanto, los valores de estas variables influyen en las restricciones de los años posteriores a t . Los coeficientes técnicos de los cultivos herbáceos, a_{ij} , se consideran constantes durante todos los años, así como las dotaciones de recursos b_i . Los coeficientes técnicos de las actividades plurianuales, a_{iht} , varían para cada año de vida del cultivo, es decir, expresan el consumo del recurso i que realiza el cultivo h en el año t de su implantación.

Las funciones objetivo más utilizadas son expresiones que maximizan la suma actualizada de los resultados económicos obtenidos en cada período y de los valores residuales de las inversiones al final del período de planificación:

$$\text{Max } f(X_{jt}, X_{ht}) = \sum_{t=1}^T \frac{R_t}{(1+r)} + \sum_{t=1}^{T-1} \frac{VR_{ht} X_{ht}}{(1+r)} \quad [2]$$

donde R_t es el flujo de caja del año t y VR_{ht} es el valor residual (por hectárea) en el año T de la plantación del cultivo h que se realizó en el año t .

El flujo de caja de cada año se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\sum_{j=1}^J R_{jt} X_{jt} + \sum_{h=1}^H R_{ht} X_{h1} + \sum_{h=1}^H R_{h(t-1)} X_{h2} + \dots + \sum_{h=1}^H R_{h(t-t+1)} X_{ht} - PNI_t \geq R_t \quad [3]$$

que expresa que la suma de los flujos de caja obtenidos de los cultivos herbáceos

$$\sum_{j=1}^J R_{jt} X_{jt}$$

más los correspondientes a los plurianuales

$$\left(\sum_{h=1}^H R_{ht} X_{h1} + \sum_{h=1}^H R_{h(t-1)} X_{h2} + \dots + \sum_{h=1}^H R_{h(t-t+1)} X_{ht} \right)$$

y menos otros pagos no imputados a los cultivos (PNI_t) ha de ser mayor o igual a R_t que es el flujo de dinero que se incorpora a la función objetivo. R_{ht} , flujo de caja del cultivo h en el año t de su implantación, es igual a cobros de explotación (C_{ht}) menos pagos (P_{ht}), incluyendo en estos tanto los pagos de inversión como los de explotación. Por tanto, R_{ht} será negativo en los primeros años de vida de la plantación y posteriormente tomará valores positivos.

Si se particulariza para el año 1, se puede ver claramente que la expresión (3) es una restricción que limita las inversiones de este año a las disponibilidades de dinero generadas en el mismo:

$$\sum_{j=1}^J R_{j1} X_{j1} - PNI_1 - R_1 \geq - \sum_{h=1}^H R_{h1} X_{h1}$$

A la izquierda de la inecuación se recogen las disponibilidades de dinero que no deben ser superadas por los consumos de las inversiones (derecha). Como los coeficientes R_{h1} , son negativos, todos los sumandos de la derecha son positivos.

Dado que se quiere analizar inversiones en plantaciones y no otro tipo de inversiones como maquinarias y equipos

que hay que renovar dentro del período de planificación T , las amortizaciones de estas inversiones se sustraen de las disponibilidades de cada año. El modelo sólo pretende recoger inversiones en cultivos plurianuales e inversiones (en maquinarias y equipos) complementarias a éstas u originadas por el incremento de capacidad productiva de la explotación, y se considera que las máquinas existentes al inicio del período de planificación se van a renovar independientemente de que se realicen o no las plantaciones de cultivos plurianuales.

Estas amortizaciones anuales se han incluido en PNI_t además de otros conceptos entre los que destaca el sueldo del agricultor.

Si en el modelo se incluye la restricción $R_t \geq 0$ el modelo sólo realiza inversiones mediante fondos propios generados en la explotación. Si no se incluye, el modelo permite financiación ajena a un tipo de interés, r , igual al tipo de actualización utilizado.

Si se considera la posibilidad de transferir fondos propios de un período a otros posteriores, la restricción (3) se transforma en (para cada $t' = 1, \dots, T$):

$$\sum_{t=1}^{t'} \left(\sum_{j=1}^J R_{jt} X_{jt} + \sum_{h=1}^H R_{ht} X_{h1} + \sum_{h=1}^H R_{h(t-1)} X_{h2} + \dots + \sum_{h=1}^H R_{h(t-t+1)} X_{ht} - PNI_t \right) \geq \sum_{t=1}^{t'} R_t \quad [4]$$

Estos modelos intertemporales son algo más que una secuencia de modelos estáticos de un solo período, ya que las oportunidades de inversión y sus formas de financiación establecen vínculos entre los diferentes períodos (Rae, 1994). Por ejemplo, las actividades de plantar cultivos plurianuales en el año 1 (X_{h1}), consumen recursos y proporcionan flujos de caja positivos en años posteriores.

Cocks, Carter (1968) y Boehlje, White (1969) exponen modelos que contemplan financiación ajena e inversiones financieras fuera de la explotación a tipos de interés diferentes entre sí y distintos al tipo de actualización. Norton, Santanillo, Echevarría (1983) utilizan un modelo multiperíodo y multicriterio para cuantificar y evaluar los beneficios de distintos programas públicos de inversión.

Una crítica importante que se puede hacer a este modelo es que se han considerado todos los coeficientes determinísticos, cuando en la realidad existe una gran incertidumbre en relación con los parámetros de los períodos de tiempo más alejados del momento actual. Esta incertidumbre se centra en los flujos de caja de los cultivos anuales y plurianuales, que dependen de otros aspectos inciertos. Por ejemplo, no se conocen los precios y subvenciones ni la Política Agraria que habrá dentro de 10 ó 20 años y tampoco se pueden determinar con precisión los rendimientos físicos futuros de los cultivos plurianuales. El considerar que estos parámetros son estocásticos, en vez de determinísticos, y utilizar programación estocástica discreta es una vía interesante para tratar este problema.

3. MODELOS DE PROGRAMACIÓN ESTOCÁSTICA DISCRETA

Estos modelos permiten tomar decisiones de forma secuencial y son recomendables cuando las decisiones de los primeros períodos pueden originar graves consecuencias en etapas posteriores, si bien presentan el inconveniente de que son más difíciles de plantear y solucionar (Escudero, Kamesan, 1995).

Un concepto importante en este tipo de modelos es el de «re-course», que se puede definir como el conjunto de decisiones correctoras que se pueden realizar una vez que ya han sido tomadas otras decisiones en períodos anteriores y después de que se disponga de más información sobre el proceso productivo.

En el caso de actividades agrarias, las decisiones sobre plantación de cultivos plurianuales en las primeras campañas del horizonte de planificación, pueden corregirse, al menos parcialmente, con el transcurso del tiempo en función de la evolución de la Política Agraria y Económica o según el crecimiento y desarrollo de la plantación. A partir de estos aspectos, se pueden definir un conjunto de escenarios $(1, 2, \dots, s, \dots, S)$. Para aquellos que sean favorables a los cultivos plurianuales, las acciones correctoras adecuadas serían aquellas que procurasen su intensificación, como por ejemplo aumentar su superficie (decisiones de plantación en años posteriores), sistemas de poda modernos o inversión en maquinaria para recolección de los frutos. Para situaciones favorables a los cultivos anuales, las decisiones de ajuste consistirían en no

aumentar las plantaciones, vender las ya realizadas u optar por sistemas de poda tradicionales (1).

Los modelos de programación estocástica han de cumplir la condición de no anticipación, que implica que si dos escenarios diferentes s y s' son iguales hasta el período t , las decisiones tomadas hasta ese momento t han de ser iguales en los dos escenarios (Rockafellar, Wets, 1991). En otras palabras, los escenarios están caracterizados por un conjunto de información (datos técnicos y económicos) en un horizonte de planificación de T años, de tal forma que s y s' pueden ser diferentes a partir de t pero tener idénticos coeficientes hasta ese período. En estas condiciones, un modelo estocástico coherente con la información disponible en cada momento obligaría a que las variables de decisión de los dos escenarios tomaran los mismos valores óptimos hasta el período t .

Considérese que se soluciona el modelo (1) para un conjunto de escenarios. Sea X_{ht}^s la variable que expresa el nivel de realización de la plantación h en el año t y en el escenario s . La notación para otras variables y coeficientes sería similar a ésta, X_{jt}^s , R_{ht}^s , R_{jt}^s . La condición de no anticipación implica que:

$X_{jt}^s = X_{jt}^{s'}$ para todo s y s' con idéntica información hasta el período t , para todo t, j .

Un inconveniente habitual de los modelos de programación estocástica es su gran dimensión debido a la existencia de varios períodos de tiempo y a la posibilidad de que ocurran distintos escenarios. Una forma de solucionar este problema es agregar los períodos de tiempo en etapas de decisión. Por ejemplo, si se consideran dos etapas de decisión, de forma que la primera incluye los 5 primeros años y la segunda los comprendidos desde el año 6 hasta T , se puede formular el siguiente modelo estocástico a partir de (1), (3) y (4):

(1) La poda de formación moderna del olivo está orientada a la recogida mecanizada del fruto. Ello permite abaratar el coste medio de la recolección, pero siempre que la superficie plantada exceda un cierto umbral de rentabilidad. Por debajo de éste, la recolección manual es más económica y es preferible el cultivo tradicional a tres pies.

$$\text{Max } f(X_{jt}^s, X_{ht}^s) = \sum_{s=1}^S W_s \left(\sum_{t=1}^T \frac{R_t^s}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^{T-1} \frac{VR_{ht}^s X_{ht}^s}{(1+r)^t} + \right)$$

sujeto a:

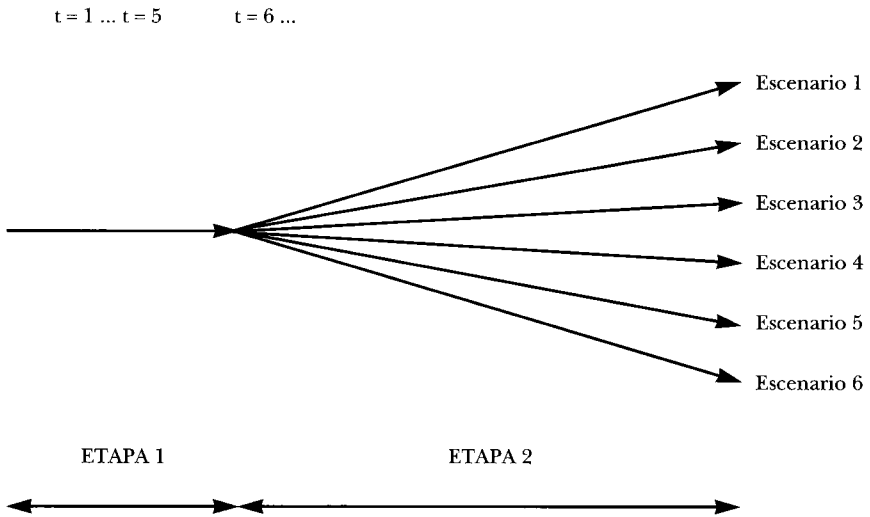
$$\begin{aligned} \sum_{h=1}^H a_{ih1} X_{h1}^s + \sum_{j=1}^J a_{ij} X_{j1}^s &\leq b_i \quad \forall i, s \\ \sum_{h=1}^H a_{ih2} X_{h1}^s + \sum_{h=1}^H a_{ih1} X_{h2}^s + \sum_{j=1}^J a_{ij} X_{h2}^s &\leq b_i \quad \forall i, s \\ \sum_{h=1}^H a_{ih3} X_{h1}^s + \sum_{h=1}^H a_{ih2} X_{h2}^s + \sum_{h=1}^H a_{ih1} X_{h3}^s + \sum_{j=1}^J a_{ij} X_{j3}^s &\leq b_i \quad \forall i, s \\ \vdots &\vdots \\ \sum_{h=1}^H a_{iht} X_{h1}^s + \sum_{h=1}^H a_{ih(t-1)} X_{h2}^s + \sum_{h=1}^H a_{ih(t-2)} X_{h3}^s + \dots + \sum_{h=1}^H a_{ih1} X_{ht}^s + \sum_{j=1}^J a_{ij} X_{jt}^s &\leq b_i \quad \forall i, s \quad [5] \\ \vdots &\vdots \\ \sum_{h=1}^H a_{ihT} X_{h1}^s + \sum_{h=1}^H a_{ih(T-1)} X_{h2}^s + \sum_{h=1}^H a_{ih(T-2)} X_{h3}^s + \dots + \sum_{h=1}^H a_{ih(T-1)} X_{ht}^s + \dots + \sum_{j=1}^J a_{ij} X_{jT}^s &\leq b_i \quad \forall i, s \\ \sum_{h=1}^H R_{ht}^s X_{h1}^s + \sum_{h=1}^H R_{ht}^s X_{h2}^s + \dots + \sum_{h=1}^H R_{ht}^s X_{ht}^s + \sum_{j=1}^J R_{jt}^s X_{jt}^s - PNI_t &\geq R_t^s \quad \forall i, s \\ X_{ht}^1 = X_{ht}^2 = \dots = X_{ht}^s \quad t = 1, \dots, 5 \\ X_{jt}^1 = X_{jt}^2 = \dots = X_{jt}^s \quad t = 1, \dots, 5 \\ X_{ht}^s = 0, X_{jt}^s \geq 0, R_t^s \geq 0 \end{aligned}$$

donde w_s es la probabilidad asociada al escenario s .

Este modelo asume que no existe incertidumbre en relación con la primera etapa, es decir, se conocen las consecuencias económicas y técnicas de las decisiones de los cinco primeros años en estos cinco años, pero hay incertidumbre sobre sus consecuencias en años posteriores. Y de la misma forma, no existe incertidumbre en la segunda etapa en relación con las consecuencias de sus decisiones en este período. Esta estructura de la información se ilustra en el esquema 1.

Alternativamente, un modelo estocástico multiperíodo se puede expresar mediante una formulación más compacta, introduciendo la condición de no anticipación al definir las variables. Esto es, sólo se consideran variables X_{ht} y X_{jt} en el primer período de decisión, mientras que en etapas posteriores se tienen en cuenta los diferentes escenarios mediante X_{ht}^s y X_{jt}^s . Las ecuaciones de no anticipación que se incluían anteriormente, ya no son necesarias porque las variables de deci-

Esquema 1



ción del primer período X_{ht} , aparecen en las restricciones de etapas posteriores en todos los escenarios s .

De esta forma, el modelo (5) para dos etapas se expresaría como:

$$\begin{aligned}
 & \text{Max } f(X_j^0, X_h^0, X_j^s, X_h^s) \\
 & \text{sujeto a:} \\
 & A_h^0 X_h^0 + A_j^0 X_j^0 \leq b^0 \\
 & A_h^{0s} X_h^0 + A_h^s X_h^s + A_j^s X_j^s \leq b^s \quad \forall s \\
 & X_j^0, X_h^0 \geq 0 \\
 & X_j^s, X_h^s \geq 0 \quad \forall s
 \end{aligned} \tag{6}$$

donde X_j^0 es el vector de variables de cultivos herbáceos j de los cinco primeros años y X_h^0 el correspondiente a los cultivos plurianuales. Los vectores de variables de la segunda etapa desde el año 6 hasta T , son X_j^s y X_h^s . Las matrices A_h^0 y A_j^0 inclu-

yen los coeficientes técnicos –del modelo [1]– y los flujos de caja de la ecuación [3] de los cultivos plurianuales y herbáceos, respectivamente, en los cinco primeros años. A_h^s son las matrices de los coeficientes técnicos y flujos de caja de los cultivos plurianuales del año 6 a T en cada escenario s, y de la misma forma A_j^s . Las matrices A_h^{0s} reúnen los coeficientes de las variables X_h^{0j} en cada escenario s de la segunda etapa. Por último, b^0 y b^s son los términos independientes según la notación empleada.

A pesar de las grandes dimensiones que alcanzan los modelos de programación estocástica discreta con varias etapas, cada vez es más frecuente su uso en distintas áreas de conocimiento. Algunos ejemplos son: planificación de la producción y almacenamiento (Britan, Sarkar, 1988; Eppen, Martin, Schrage, 1989; Escudero, Kamesan, 1995), planificación de la energía eléctrica (Álvarez *et al.*, 1994), selección de carteras y planificación de inversiones financieras (Zenios, 1991; Mulvey, Vladimirov, 1992; Golub *et al.*, 1995), planificación de actividades agrarias (Rae, 1971 a, 1971 b; Kaiser *et al.*, 1993; Kingwell *et al.*, 1993; Taylor, Young, 1995; Jacquet, Pluvillage, 1997).

Una vía alternativa para resolver problemas de inversión bajo incertidumbre es mediante programación dinámica (Bellman, 1957; Kennedy, 1986; Dixit, Pindyck, 1994), si bien presenta el inconveniente de que se convierte en intratable cuando intervienen más de tres variables que interaccionan entre los distintos períodos (Bellman, Dreyfus, 1962; Kennedy, 1986).

4. UNA APLICACIÓN A LA PLANIFICACIÓN DE PLANTACIONES DE OLIVOS EN CASTILLA-LA MANCHA

Los modelos anteriores se han aplicado a la planificación de plantaciones de olivos en explotaciones agrarias de la comarca Campo de Montiel (Ciudad-Real). Los datos utilizados en los modelos proceden de información suministrada por agricultores y técnicos de la zona en el año 1997. El estudio se ha centrado en explotaciones cerealistas de 100 ha de dimensión.

El cuadro 3 recoge datos económicos sobre los 9 cultivos herbáceos definidos. Éstos son cebada, trigo y girasol en tres

Cuadro 3

DATOS ECONÓMICOS DE LOS CULTIVOS HERBÁCEOS

Cultivo	Rendimiento kg/ha	Precio ptas./kg	Pago compen- satorio ptas./ha	Cobro total ptas./ha	Pago total ptas./ha	Margen bruto
cebada 1	1.000	22	10.693	32.693	30.000	2.693
cebada 2	1.500	22	10.693	43.693	30.000	13.693
cebada 3	2.000	22	10.693	54.693	30.000	24.693
trigo 1	1.000	26	10.693	36.693	30.000	6.693
trigo 2	1.300	26	10.693	44.493	30.000	14.493
trigo 3	1.600	26	10.693	52.293	30.000	22.293
girasol 1	100	33	18.544	21.844	18.000	3.844
girasol 2	400	33	18.544	31.744	18.000	13.744
girasol 3	700	33	18.544	41.644	18.000	23.644

Cuadro 4

COEFICIENTES TÉCNICOS DE LOS CULTIVOS HERBÁCEOS

	cebada ₁	cebada ₂	cebada ₃	trigo ₁	trigo ₂	trigo ₃	girasol ₁	girasol ₂	girasol ₃	moa	D. recurs.
ocupación 1	1			1			1				25
ocupación 2		1			1			1			50
ocupación 3			1			1			1		25
mo 1(horas/ha)	2	2	2								360
mo 2(horas/ha)	1	1	1	1	1	1	3	3	3		360
mo 3(horas/ha)							2	2	2		405
mo 4(horas/ha)	1	1	1	1	1	1					450
mo 5(horas/ha)				3	3	3	1	1	1		405
mo 6(horas/ha)	3	3	3	2	2	2					360
frecuencia 1							4				25
frecuencia 2								3			50
frecuencia 3									3		25

clases distintas de suelos: suelos pobres con rendimientos bajos (subíndice 1), rendimientos medios de la comarca (subíndice 2), rendimientos superiores a la media comarcal (subíndice 3). Esta diferenciación de cultivos según el tipo de terreno en que se siembra responde al interés de que el modelo determine en qué clase de suelo es conveniente realizar plantaciones de olivos. El sueldo del agricultor no se ha incluido en los márgenes brutos de los cultivos porque se recoge dentro de pagos no imputados (PNI_i).

En el cuadro 4 aparecen los coeficientes técnicos de los cultivos en cada año. Hay una restricción de ocupación para cada tipo de suelo, siendo su disponibilidad de 25, 50 y 25 ha, respectivamente.

Las restricciones de mano de obra se han definido para períodos de dos meses, desde enero-febrero (mo 1) hasta noviembre-diciembre (mo 6). Las disponibilidades de mano de obra son las correspondientes a un trabajador a tiempo completo en la explotación, considerando 45 jornadas laborables en cada período bimensual y jornadas de 8 horas (enero-febrero, marzo-abril y noviembre-diciembre), 9 horas (mayo-junio y septiembre-octubre) y 10 horas (julio-agosto). La penúltima columna (moa) recoge los coeficientes de las variables mano de obra ajena contratada en cada período bimensual de cada año. Este concepto disminuye el flujo de caja de cada año a razón de 625 ptas./hora (5.000 ptas./jornada). Se ha limitado la contratación de mano de obra ajena al equivalente en horas de 4 trabajadores.

Para cada tipo de suelo se ha incluido una restricción de frecuencia para el girasol. Para los suelos de peor calidad esta restricción es más severa.

Para cada tipo de suelo se contempla la posibilidad de plantar olivos con una densidad de 200 árboles/ha (7 m × 7 m). Los coeficientes técnicos del cultivo del olivo en los suelos de peor calidad (olivo₁) se muestran en el cuadro 5. Los coeficientes del período mo 2 corresponden a la plantación (año 1) y podas y labores (año 2 y siguientes). Los coeficientes de mo 4 en los años 1 y 2 corresponden a riegos con cuba en los meses de verano. La entrada en producción en el año 6 se refleja con el coeficiente 50 horas/ha para la recolección a

Cuadro 5

COEFICIENTES TÉCNICOS DEL CULTIVO DEL OLIVO

olivo ₁	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5	año 6 y sig.
ocupación 1	1	1	1	1	1	1
ocupación 2						
ocupación 3						
mo 1 (horas/ha)						50
mo 2 (horas/ha)	24	16	16	16	16	16
mo 3 (horas/ha)		4	4	4	4	4
mo 4 (horas/ha)	24	24				
mo 5 (horas/ha)	2	2	2	2	2	2
mo 6 (horas/ha)						
rotación 1						
rotación 2						
rotación 3						

mano de la aceituna en los meses de enero y febrero. Los coeficientes no mencionados corresponden a tratamientos fitosanitarios, aplicación de herbicidas y otras labores. Las matrices correspondientes a olivo₂ y olivo₃ (plantación de olivos en los otros dos tipos de suelo) sólo varían en que la fila de coeficientes unidad pasa a las restricciones ocupación 2 y ocupación 3, respectivamente.

El período de planificación que se considera es de 100 años y se contempla la posibilidad de que en cada tipo de suelo y en cada año se puedan realizar plantaciones de olivos. Es decir, para cada escenario el modelo tiene definidas 300 variables que representan plantaciones de olivos.

Se ha pensado que la financiación se suele hacer en estos casos con fondos propios y, por tanto, el modelo no recoge la posibilidad de que el agricultor pida dinero prestado para realizar estas inversiones. La información recogida en la comarca ha conducido a fijar unos pagos no imputados bajos ($PNI_t = 1$ millón de ptas.). En esta línea, otros trabajos como Alonso *et al.* (1995) muestran que la escasa remuneración de los factores productivos es algo frecuente en las empresas agrarias de la meseta.

Los escenarios que se han definido afectan exclusivamente a los resultados económicos de las plantaciones de olivo, dado que se piensa que la principal fuente de incertidumbre son los rendimientos físicos futuros y la forma y la cuantía de las ayudas.

Se ha formulado el modelo (5) con dos etapas y seis escenarios según el esquema 1. La caracterización de los escenarios se realiza en el cuadro 6 y sus datos se incluyen en el cua-

Cuadro 6

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESCENARIOS EN EL MODELO DE DOS ETAPAS

Escenario	Rendimientos (kg/ha)		Ayuda	
	años 6 a 10	años 11 a 60		
1	500	1.300	árbol	51.654 ptas./ha
2	500	1.300	producción	47 ptas./kg aceituna
3	500	1.300	árbol	25.827 ptas./ha
4	500	800	árbol	51.654 ptas./ha
5	500	800	producción	47 ptas./kg aceituna
6	500	800	árbol	25.827 ptas./ha

dro 7. A cada escenario se le ha asignado la misma probabilidad de ocurrencia W_s .

Los datos en los cinco primeros años son iguales en todos los escenarios. Los rendimientos físicos en los años 6 a 10, que es una fase de entrada en producción, son 500 kg/ha en todos los escenarios, aunque se diferencian tres situaciones de ayudas. A partir del año 11, se han tenido en cuenta dos posibles situaciones de rendimientos futuros, 1.300 y 800 kg/ha, y tres posibles situaciones de ayudas en función del informe sobre Reforma de la organización común del mercado del aceite de oliva de la Unión Europea:

- Ayuda de 4,5 ecus/árbol (escenarios 1 y 4) (2),
- Ayuda a la producción similar a la actual (escenarios 2 y 5),
- Ayuda de 2,25 ecus/árbol (escenarios 3 y 6), dado que este documento establece que cada país podrá distribuir hasta el 50 por ciento de la ayuda basándose en criterios de distintas condiciones de producción.

Los pagos anuales a partir del año 5 son 35.000 ptas./ha, y no consideran la mano de obra ajena. Esto quiere decir que los márgenes brutos que aparecen en el cuadro 7 disminuyen

Cuadro 7

MÁRGENES BRUTOS DEL CULTIVO DEL OLIVO
EN CADA ESCENARIO DOS ETAPAS (ptas./ha)

Escenario	ETAPA 1					ETAPA 2	
	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5	año 6 a 10	años 11 a 60
1	-100.000	-45.000	-30.000	-30.000	-30.000	56.654	120.654
2	-100.000	-45.000	-30.000	-30.000	-30.000	28.500	130.100
3	-100.000	-45.000	-30.000	-30.000	-30.000	30.827	94.827
4	-100.000	-45.000	-30.000	-30.000	-30.000	56.654	80.654
5	-100.000	-45.000	-30.000	-30.000	-30.000	28.500	66.600
6	-100.000	-45.000	-30.000	-30.000	-30.000	30.654	54.654

(2) Para transformar esta ayuda en ptas./ha se ha tomado una densidad de plantación de 70 árboles/ha que es el marco tradicional en la comarca en vez de 200 árboles/ha. Este cambio se ha realizado para no sobrevalorar una ayuda sobre la que existe una gran incertidumbre. Por otra parte, esto permite extrapolar los resultados que se obtengan a plantaciones de marcos tradicionales.

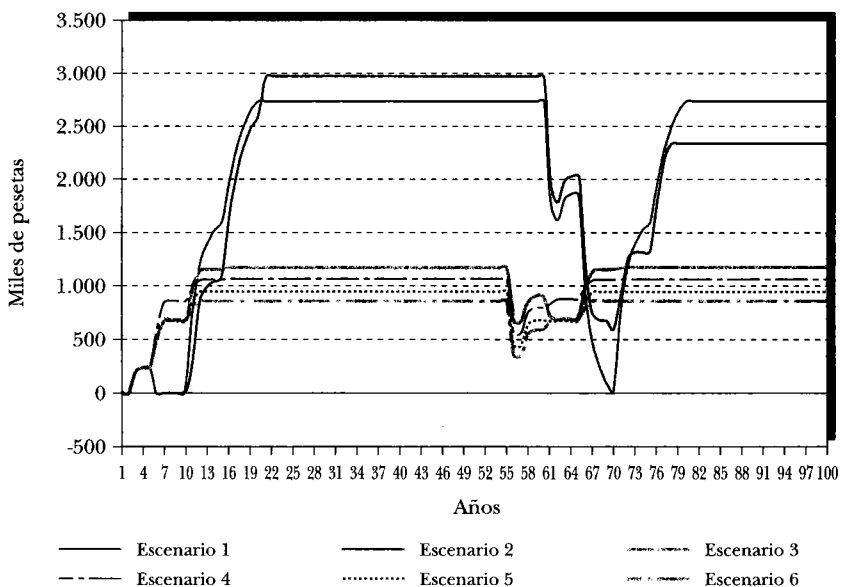
automáticamente al resolver el modelo, para cada hectárea de olivo adicional que suponga contratar mano de obra de fuera de la explotación. El precio de la aceituna se ha fijado en 80 ptas./kg.

5. RESULTADOS

El modelo de programación estocástica discreta con dos etapas tiene un total de 15.000 variables y 7.876 restricciones que forman una matriz con 502.152 coeficientes distintos de cero. Se ha solucionado con una tasa de actualización del 10 por ciento y en los resultados se observa que sólo las variables del olivar en suelos de rendimientos bajos toman valores distintos de cero. La estrategia que indica el modelo es plantar 7,4 ha de olivar en tierras marginales durante los tres primeros años y en la segunda etapa se plantaría solamente en los escenarios favorables (1 y 2). Estos valores se muestran en el cuadro. Los perfiles de los flujos de caja se representan en el gráfico 1.

Gráfico 1

Evolución de los flujos de caja en el modelo estocástico



El cuadro 9 expone los resultados de solucionar cada escenario de forma independiente. Las soluciones muestran las decisiones óptimas que debería tomar el agricultor si tuviera la certeza de encontrarse en cada uno de esos escenarios. Los valores óptimos sobre plantaciones de olivos en la primera etapa (cuadro 8) son soluciones robustas ante la posibilidad de que ocurra en el futuro cualquier escenario. Los valores óptimos de plantaciones de olivos en la segunda etapa están supeditadas a la verificación de cada escenario.

A continuación se realiza analiza la sensibilidad del modelo a algunos de los coeficientes utilizados:

a) Tasa de actualización

La utilización de tasas de actualización más bajas es una vía para tratar la incertidumbre con respecto a este parámetro pero también puede interpretarse como una forma de determinar las estrategias de plantación de agricultores con un grado menor de aversión al riesgo. Para una tasa de actualización del 5 por ciento, la solución óptima del modelo estocástico incluye la plantación de 11,5 ha de olivos en los suelos de rendimientos bajos en la primera etapa según la secuencia

Cuadro 8

PLANTACIONES DE OLIVOS EN SUELOS DE RENDIMIENTOS BAJOS
MODELO ESTOCÁSTICO DE DOS ETAPAS (ha, $r = 0,1$)

Año	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
1	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
2	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	6,2	4,9	0,3	0,3	0,0	0,0
7	4,9	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0
8	3,2	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0
9	2,2	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0
10	1,3	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	3,6	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Cuadro 9

PLANTACIONES DE OLIVOS EN SUELOS DE RENDIMIENTOS BAJOS
 ESCENARIOS INDEPENDIENTES (ha, r = 0,1)

Año	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
1	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
2	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
3	1,9	1,9	0,4	0,4	0,1	0,1
4	1,3	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0
5	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	4,5	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0
7	4,1	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	3,5	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0
9	1,4	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

que aparece en el cuadro 10. En la segunda etapa en los escenarios 1 a 4 se completa la plantación hasta la superficie disponible de este tipo de suelo (25 ha), mientras que en el escenario 5 sólo se llega a 17,3 ha y en el 6 no se realizan nuevas plantaciones. En suelos de rendimientos medios se plantan 12,1 ha de olivos en los escenarios 1 y 2 y 11,1 ha en el 3 en los años que muestra el cuadro 11.

b) Coste salarial de la mano de obra

En el cuadro 12 se recoge el efecto de aumentar el coste de la mano de obra ajena a 6.000 ptas./jornada. En la primera etapa la superficie plantada de olivos disminuye ligeramente, pasando de 11,5 ha (cuadro 11, 5.000 ptas./jornada) a 10,5 (cuadro 12). En la segunda etapa, desaparecen las plantaciones de olivos en el escenario 5. Para costes salariales de 8.000 ptas./jornada la plantación de olivos en la primera etapa se reduce a 6,6 ha (4,8 ha el primer año y 1,8 ha el segundo).

c) Mecanización de la recolección

Se ha determinado la plantación óptima de un agricultor cuya intención fuera realizar recolección mecanizada mediante el alquiler de un vibrador. Los cambios introducidos son: las

Cuadro 10

PLANTACIONES DE OLIVOS EN SUELOS DE RENDIMIENTOS BAJOS
 MODELO ESTOCÁSTICO DE DOS ETAPAS (ha, $r = 0,05$)

Año	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
1	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
2	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
3	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
6	4,5	3,3	3,4	4,5	3,3	0,0
7	4,1	3,0	3,1	4,1	1,6	0,0
8	3,5	2,4	2,4	3,5	0,6	0,0
9	1,4	1,8	1,9	1,4	0,2	0,0
10	0,0	1,4	1,5	0,0	0,1	0,0
11	0,0	1,6	1,1	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Cuadro 11

PLANTACIONES DE OLIVOS EN SUELOS DE RENDIMIENTOS MEDIOS
 MODELO ESTOCÁSTICO DE DOS ETAPAS (ha, $r = 0,05$)

Año	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	5,6	3,9	3,0	0,0	0,0	0,0
12	2,4	5,3	4,0	0,0	0,0	0,0
13	0,7	2,3	3,9	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0

necesidades de mano de obra para recolección pasan de 50 horas/ha a 7 horas/ha, se asigna un precio de alquiler de 35.000 ptas./ha (5.000 pta/hora). La solución obtenida es que con estos datos no se deben realizar plantaciones de olivo en ningún escenario. Para precios de alquiler de 4.000 ptas./hora la solución óptima es plantar aproximadamente unas 17 ha de

Cuadro 12

PLANTACIONES DE OLIVOS EN SUELOS DE RENDIMIENTOS BAJOS. MODELO ESTOCÁSTICO DE DOS ETAPAS. COSTE SALARIAL 6.000 ptas./jornada (ha, $r = 0,05$)

Año	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
1	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
2	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
3	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	5,0	3,8	3,9	4,4	0,0	0,0
7	3,8	2,8	2,9	1,5	0,0	0,0
8	3,3	2,2	2,3	0,5	0,0	0,0
9	2,4	1,6	1,7	0,2	0,0	0,0
10	0,0	1,1	1,1	0,1	0,0	0,0
11	0,0	3,0	2,6	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

olivos en los escenarios 1 y 2, de forma escalonada a partir del año 6. Plantaciones en la primera etapa sólo se producen si el alquiler del vibrador es inferior a 3.000 ptas./hora. Este coste parece poco probable teniendo en cuenta que el coste de utilización es superior a las 4.000 ptas./hora según Gerrero (1994).

d) Ayudas al establecimiento de plantaciones de olivos

Realizar este tipo de acciones por parte de las administraciones públicas supone un apoyo para evitar la degradación de las tierras más pobres y para impulsar un cultivo que tradicionalmente ha estado menos protegido que los cereales. En esta línea, la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha ha iniciado recientemente un programa de ayudas para la modernización del olivar tradicional y para el establecimiento de nuevas plantaciones en las tierras en las que años atrás se arrancaron viñas. El cuadro 13 muestra los efectos de conceder una ayuda de 80.000 ptas./ha en el primer año de la plantación. Si se compara con el cuadro 8 se puede ver como en los tres primeros años se incrementa la superficie plantada en 5,8 ha. En la segunda etapa los escenarios 1 y 2 completan la

Cuadro 13

PLANTACIONES DE OLIVOS EN SUELOS DE RENDIMIENTOS BAJOS.
 MODELO ESTOCÁSTICO DE DOS ETAPAS. AYUDA AL ESTABLECIMIENTO (ha, $r = 0,1$)

Año	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
1	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
2	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
3	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	11,8	9,3	2,7	2,7	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,9	0,9	0,0	0,0
8	0,0	2,5	0,3	0,3	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

plantación hasta 25 ha, los escenarios 3 y 4 hasta 17,3 ha y los escenarios 5 y 6 hasta 13,2 ha. En los suelos de rendimientos medios se plantan 10 ha en los escenarios 1 y 2.

6. CONCLUSIONES

Los modelos de programación estocástica discreta permiten planificar actividades agrarias en el largo plazo teniendo en cuenta la incertidumbre con respecto a los parámetros. Los resultados que se obtienen muestran la secuencia de plantaciones que hay que realizar en el horizonte de planificación.

En este trabajo sólo se han tenido en cuenta acciones correctoras relacionadas con aumentar la superficie de cultivos plurianuales pero sería interesante incorporar otro tipo de decisiones como compra de maquinaria para recolección, técnicas de poda, marcos de plantación, transformación de secano en regadío, etc.

El principal problema de los modelos de programación estocástica discreta es su gran dimensión y la lentitud en su resolución. Sin embargo, la planificación de la producción de un problema real debe realizarse tratando de forma explícita la incertidumbre de un gran número de parámetros. En esta apli-

cación práctica, por ejemplo, el modelo sería más real si los escenarios se hubieran definido también en función de distintos estados de la naturaleza para las tasas de actualización, márgenes brutos de los cultivos herbáceos y tasas de inflación. Una línea de investigación interesante para disminuir los tiempos de resolución es aprovechar la estructura particular del modelo y utilizar algoritmos de descomposición (Danzig, Wolfe, 1960; Benders, 1962; Alvarez *et al.*, 1994, entre otros).

Los resultados de la aplicación muestran que en explotaciones cerealistas de secano de 100 ha de la zona estudiada y en los próximos 5 años, las plantaciones de olivos son aconsejables en las tierras de peor calidad en una cuantía entre 7,4 ha (para los agricultores menos arriesgados) y 11,5 (para los individuos más arriesgados). En años posteriores se podrían ampliar hasta 25 ha si se diesen las condiciones técnicas y económicas más favorables. Sin embargo, no parece rentable la inversión en plantaciones de olivos en tierras de calidad superior a la mencionada.

La utilización de vibrador alquilado para la recolección tampoco parece rentable para precios de alquiler superiores a las 3.000 ptas./hora.

Las conclusiones obtenidas en la aplicación práctica están referidas a un caso muy particular y no se pueden generalizar. Sin embargo, la formulación matemática de los modelos presentados en este trabajo se puede aplicar sin apenas variación a cualquier tipo de explotación agraria y a cualquier tipo de cultivo. □

BIBLIOGRAFÍA

- ALONSO, R.; ARIAS, P.; IRURETAGOYENA, M. T.; LOZANO, J.; SERRANO, A. y ALARCÓN, S. (1995): La estructura productiva, costes de producción y resultados de la explotaciones de Arévalo-Madrigal (Ávila). *Monografías INIA*, 90.
- ÁLVAREZ, M.; CUEVAS, C. V.; ESCUDERO, L. F.; DE LA FUENTE, J. L. y PRIETO, F. J. (1994): «Network planning under uncertainty with an application to hydropower generation». *TOP*, 2 (1): pp. 25-58.
- BELLMAN, R. (1957): *Dynamic Programming*. Princeton University Press.
- BELLMAN, R. y DREYFUS, S. (1962): *Applied Dynamic Programming*. Princeton University Press.

- BOEHLJE, M. D. y WHITE, T. K. (1969): A production-investment decision model of farm firm growth. *American Journal of Agricultural Economics*, 51: pp. 546-563.
- BENDERS, J. F. (1962): «Partitioning procedures for solving mixed variables programming problems». *Numerische Mathematik*, 4: pp. 238-252.
- BRITAN, G. y SARKAR, S. (1988): «On upper bounds of sequential stochastic production planning problems». *European Journal of Operational Research*, 34: pp. 191-207.
- COCKS, K. D. y CARTER, H. O. (1968). «Micro goal functions and economic planning». *American Journal of Agricultural Economics*, 50: pp. 400-411.
- CIVANTOS, L. (1995): «Evolución de la superficie del olivar y de las producciones de aceite de oliva en España». *Olivae*, 59: pp. 18-21.
- DANZIG, G. B. y WOLFE, P. (1960): «A decomposition principle and Lagrange multipliers». *Operations Research*, 8: pp. 101-111.
- DE LA PUERTA, C. (1996): «Olivar y aceite de oliva en Castilla-La Mancha». *Revista Agricultura*, noviembre, 772: pp. 669-671.
- DIXIT, A. V. y PINDYCK, R. S. (1994): *Investment under uncertainty*. Princeton University Press.
- ESCUDERO, L. F. y KAMESAN, P. V. (1995): «On solving stochastic production planning problems via scenario modelling». *TOP*, 3 (1): pp. 69-95.
- EPPEN, G. D.; MARTIN, R. K. y SCHRAGE, L. (1989): «A scenario approach to capacity planning». *Operations Research*, 37: pp. 517-527.
- GOLUB, B.; HOLMER, M.; MCKENDALL, R.; POHLMAN, L. y ZENIOS, S. A. (1995): «A stochastic programming model for money management». *European Journal of Operational Research*, 85: pp. 282-296.
- GUERRERO, A. (1994): *Nueva olivicultura*. Ediciones Mundi-Prensa.
- HAZELL, P. B. R. y NORTON, R. D. (1986): *Mathematical programming for economic analysis in agriculture*. MacMillan Publishing Company, New York.
- HUMANES, J. (1996): El Olivar Español en el Siglo XX. *Revista Agricultura*, 772: pp. 10-911.
- INE (1991): *Censo Agrario 1989*. Tomo IV. Resultados Comarcales y Municipales. Ciudad-Real. Instituto Nacional de Estadística, Madrid.
- INE (1991): *Censo Agrario 1989*. Tomo IV. Resultados comarcales y municipales. Toledo. Instituto Nacional de Estadística, Madrid.
- JACQUET, F. y PLUVLNAGE, J. (1997): Climate uncertainty and farm policy: a discrete stochastic programming model for cereal-livestock farms in Algeria. *Agricultural Systems*, 53: pp. 387-407.

- KAISER, H. M.; RIHA, S. J.; WILKS, D. S.; ROSSITER, D. G. y SAMPATH, R. (1993): «A farm-level analysis of economic and agronomic impacts of gradual climate warming». *American Journal of Agricultural Economics*, 75: pp. 387-398.
- KENNEDY, J. O. S. (1986): *Dynamic programming. Applications to agriculture and natural resource*. Elsevier Applied Science Publishers.
- KINGWELL, R. S.; PANNELL, D. J. y ROBINSON, S. D. (1993): «Tactical responses to seasonal conditions in whole-farm planning in Western Australia». *Agricultural Economics*, 8: pp. 211-226.
- LUCHETTI, F. (1996): «Panorama general de la olivicultura mundial». *Revista Agricultura*, 772: pp. 906-909.
- MAPA (varios años): *Anuario de Estadística Agraria*. Secretaría General Técnica, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- MULVEY, J. M. y VLADIMIROU, H. (1992): «Stochastic network programming for financial planning problems». *Management Science*, 38 (11): pp. 1.642-1.664.
- NORTON, R. D.; SANTANIELLO, V. y ECHEVARRÍA, J. A. (1983): «Economic evaluation of an agricultural sector investment program: A case study for Peru». *Journal of Policy Modeling*, 5 (2): pp. 149-177.
- RAE, A. N. (1971 a). «Stochastic programming, utility, and sequential decision problems in farm management». *American Journal of Agricultural Economics*, 53: pp. 448-460.
- RAE, A. N. (1971 a): «An empirical application and evaluation of discrete stochastic programming in farm management». *American Journal of Agricultural Economics*, 53: pp. 448-460.
- RAE, A. N. (1994): *Agricultural management economics. Activity analysis and decision making*. ed. CAB International. Wallingford.
- ROCKAFELLAR, R. T. y WETS, R. J. B. (1991): «Scenario and policy aggregation in optimization under uncertainty». *Mathematics of Operations Research*, 16: pp. 119-47.
- SUMPSE, J. M. y BARCELÓ, L. V. (1996): *La Ronda de Uruguay el sector agroalimentario español. 2.4. Aceite de Oliva*. Serie Estudios. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- TAYLOR, R. G. y YOUNG, R. A. (1995): «Rural-to-urban water transfers: measuring direct foregone benefits of irrigation water under uncertain water supplies». *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 20 (2): pp. 247-262.
- ZENIOS, S. A. (1991): *Financial Optimization*. Cambridge University Press.

RESUMEN

La programación estocástica discreta como instrumento de planificación de plantaciones de olivos en Castilla-La Mancha

La planificación de la producción en el largo plazo tiene como principal problema la existencia de incertidumbre con respecto a futuras situaciones técnicas y económicas. La programación estocástica discreta afronta este problema mediante la definición de escenarios. En este trabajo se presenta una programación estocástica para resolver problemas de planificación de cultivos plurianuales en explotaciones agrarias y se realiza una aplicación particular a la planificación de plantaciones de olivos en explotaciones cerealistas de secano en Castilla-La Mancha. Los resultados obtenidos permiten responder a algunas de las dudas estratégicas planteadas.

PALABRAS CLAVE: Programación estocástica discreta, incertidumbre, cultivos plurianuales.

RÉSUMÉ

La programmation stochastique discrète en tant qu'instrument de planification de plantation d'oliviers dans la communauté autonome de Castille-La Manche

La planification de la production à long terme se heurte essentiellement au problème de l'existence d'un certain nombre d'incertitudes sur le plan des futures situations techniques et économiques. La programmation stochastique discrète aborde ce problème par la définition des scénarios. Ce travail présente une programmation stochastique susceptible de résoudre des problèmes de planification de cultures plurianuelles dans des exploitations agricoles et envisage une application particulière à la planification de plantations d'oliviers dans des exploitations céréalistes non irriguées de la communauté autonome de Castille-La Manche. Les résultats obtenus permettant de répondre à un certain nombre de doutes stratégiques qui subsistaient.

MÔTS CLÉF: Programmation stochastique discrète, incertitude, cultures pluriannuelles.

SUMMARY

Discrete stochastic programming as a tool for planning olive plantations in Castile-La Mancha

The main problem with long-term planning is the existence of uncertainty with regard to future technical and economic situations. Discrete stochastic programming addresses this problem by defining scenarios. In this paper, a stochastic programming for solving continuous crop planning problems on arable farms is presented, applied in particular to olive plantations planning on dry land cereal holdings in Castile-La Mancha. The results obtained answer some of the strategic questions raised.

KEYWORDS: Discrete stochastic programming, uncertainty, continuous crops.

