

# PLANIFICACION DEL USO DEL TERRITORIO Y PROGRAMACION MATEMATICA MULTICRITERIO

Por  
JULIO BERBEL VECINO (\*)

## I. INTRODUCCION

La gestión del territorio implica la consideración de unos objetivos económicos, sociales y ecológicos, que suelen estar en conflicto en la mayoría de los problemas reales. Para la correcta gestión del territorio es necesario que las funciones de planificación y control del uso de los recursos se lleven a cabo de la mejor manera posible. Planificar es organizar una serie de recursos susceptibles de usos alternativos de modo que se consigan unos objetivos previamente fijados mientras que controlar es una actividad estrechamente unida a la anterior y que intenta analizar y conocer el empleo y gestión de los recursos disponibles de modo que no nos alejemos del plan que se ha marcado.

Los planes de gestión deben ser realizados a diferentes escalas y plazos: a largo plazo y a gran escala, nos encontramos con planes diseñados por organismos municipales, comarcales, regionales, etc. El nivel de detalle de estos planes no es muy elevado, sin embargo

---

(\*) Departamento de Economía Agraria. ETSIAM Universidad de Córdoba.

NOTA: Una versión previa de este artículo fue presentada al Congreso I092 (Evora-Portugal). Es necesario agradecer los comentarios de dos revisores anónimos.

– Revista de Estudios Agro-Sociales. Núm. 159 (enero-marzo 1992).

---

deben servir de base para el desarrollo de la gestión a niveles inferiores. Un ejemplo reciente de métodos heurísticos para la planificación del territorio es Christodoulou y Nakos (1991), donde el lector puede encontrar otras referencias.

A menor escala están los planes de gestión de fincas, que son realizados a corto o largo plazo, pero que deben ser muy detallados para tener utilidad. Los objetivos en términos generales deben coincidir o al menos no estar en conflicto con los señalados a nivel superior, sin embargo, nuevos criterios de interés privado hacen aparición a este nivel. Por último, estos planes deben tener una revisión periódica de forma que se adapten a las circunstancias que son siempre cambiantes en todos los aspectos que dependen de la naturaleza biológica y del entorno económico, social, institucional, etc., en que nos movemos.

¿Como se han hecho los planes de gestión de recursos naturales en general y de gestión del territorio en particular? En casi todo el mundo, y en España particularmente, esto se ha hecho de forma heurística, o sea, «a ojo de buen cubero». Este sistema es el mejor de los posibles cuando *no existen datos disponibles y fiables* del sistema, o bien porque no se dispone de modelos formales del sistema que se va a planificar. Por tanto, hasta ahora, el criterio del experto era el mejor de los métodos posibles para planificar un sistema natural.

Nuestro trabajo tratará sobre *métodos de decisión*, que forman parte de la ciencia de la gestión (*management science*), y dentro de esta rama de la ciencia, de una subdisciplina conocida como *programación matemática*. En el desarrollo de la II Guerra Mundial, la organización de cantidades enormes de recursos humanos y materiales, y la existencia de algunos adelantos técnicos hizo posible el desarrollo de la Investigación Operativa (I.O.). La conjunción de los métodos de la I.O. con el desarrollo de los ordenadores ha permitido que hoy día contemos con la posibilidad de utilizar métodos matemáticos para la gestión de recursos naturales.

El propósito de este trabajo es claramente de carácter divulgatorio intentando mostrar las posibilidades de la teoría de la decisión multicriterio en la planificación del uso del territorio.

---

## II. PROGRAMACION MATEMATICA Y GESTION DE RECURSOS NATURALES

El empleo de la palabra *programación matemática* (o *planificación*) hace referencia al uso de un conjunto formalizado de instrucciones para resolver los problemas. La forma más poderosa y eficiente de atacar un problema con métodos *numéricos* es por medio de un *algoritmo* de optimización numérica. Este tipo de algoritmo es un conjunto de operaciones matemáticas ejecutadas según una secuencia específica. Normalmente, partiendo de una solución inicial, el algoritmo se usa para encontrar una solución nueva y mejor, deteniéndose cuando se ha llegado a un óptimo, o a un nivel satisfactorio (algoritmo iterativo).

La ventaja de utilizar la programación matemática en la gestión de recursos naturales es el evitar que la búsqueda de la solución óptima implique realizar una búsqueda exhaustiva en el conjunto de todas las soluciones posibles. Por todo ello, podemos concluir que *la programación matemática se dedica a la asignación óptima de recursos escasos susceptibles de usos alternativos a través del uso de modelos formales de los sistemas y de algoritmos lógico-matemáticos que operen con dicho modelo*. Para ello es esencial el desarrollo de un modelo lógico matemático que represente el mundo real que quiere planificarse.

Los números que representan la solución óptima, resultado de un programa matemático son válidos sólo si el modelo matemático es realista. Sin embargo, *el propósito de un modelo matemático es, en muchos casos, la comprensión del problema, no los números*. Cualquier tendencia a pensar en la programación matemática como un sustituto del sentido común y el razonamiento lógico debería ser condenado por pretencioso y abocado al fracaso. En otras ocasiones (una presa, una ala de un avión, etc.) los números concretos son el objeto del modelo, pero éste no suele ser el caso en los modelos de gestión de recursos naturales.

Más adelante desarrollaremos la programación (lineal) multicriterio. Además de estos tipos de programación matemática, y sin tratar de ser exhaustivos, podemos comentar la existencia de:

---

- \* programación entera (y mixta)
- \* programación cuadrática
- \* programación convexa
- \* modelos de gestión de redes (CPM, transporte, diseño de rutas, ...)
- \* programación dinámica
- \* etc.

La simulación es otro método formal de resolver modelos, si bien su uso no se suele incluir como parte de la programación (a menos que forme parte de un algoritmo más amplio).

Hoy día, contamos con el aparato matemático y los medios materiales para resolver la mayoría de los modelos con las técnicas comentadas. Seguiremos insistiendo en la programación lineal por haber sido ya introducida y ser la menos exigente en datos, y la más fácil de comprender por el técnico que no está familiarizado con estos temas. Hay que comentar que las técnicas no lineales (a las que a veces hay que recurrir) llegan en determinados casos a un subóptimo y su uso es más costoso en datos y recursos que las técnicas lineales.

Dentro de este enfoque, pueden verse algunos ejemplos de planificación agraria en Romero y Rehman (1989) y de planificación forestal en Romero (1989), ejemplos que podemos encuadrar dentro de la planificación del turno de corte y el problema de las mezclas a coste mínimo. Vamos a comentar el problema de la planificación del uso del territorio con vocación agroforestal que puede ser resuelto por medio de la Programación Lineal Multicriterio, y del que escasean los antecedentes en España. Por comentar algún ejemplo reciente de los enfoques de programación lineales podemos citar el trabajo de Zadnik Stirn (1990) dentro de la programación dinámica discreta.

### III. LA PROGRAMACION MULTICRITERIO Y LA PLANIFICACION DEL TERRITORIO

El modelo que estudiaremos es parte del trabajo de Berbel y Zamora (1992). Se hará una introducción a la planificación multicriterio en la gestión de recursos naturales en sentido amplio.

---

Las técnicas de decisión multicriterio (MCDM) han visto un rápido desarrollo en las publicaciones de Investigación Operativa y Gestión de Empresas durante los últimos 20 años. El empleo de técnicas MCDM en campos como gestión de recursos hídricos o planificación forestal han sido muy numerosas. Las aplicaciones de estas técnicas a la planificación agraria han sido más recientes. Romero y Rehman (1989) presentan ejemplos de problemas de decisión donde aparecen conflictos entre objetivos públicos y privados. Estos autores también demuestran la utilidad de MCDM en la formulación de dietas, entre otras aplicaciones.

Por otro lado, la literatura en el uso de técnicas interactivas dentro de modelos de decisión es muy extensa, pero la aplicación de estas técnicas a la gestión de recursos agro-forestales es más escasa. Esto es especialmente lamentable, ya que la existencia de múltiples objetivos (en conflicto o relacionados) en la planificación de recursos naturales está bien clara. El trabajo que presentaremos describirá una metodología en la que varios objetivos son explicitados por el analista a un centro decisor de forma que puedan emplearse técnicas interactivas multicriterio.

Antes de atacar el problema y el método desarrollado, es conveniente hacer una revisión de los diferentes grupos de técnicas que se han aplicado a la gestión de recursos naturales; en este sentido, una revisión muy extensa sobre el tema puede verse en Romero y Rehman (1987).

La primera técnica que comentaremos es la programación por metas (*goal programming*, GP). GP se aplica cuando el problema incluye múltiples metas. Una **meta** (*goal*) combina un **objetivo** y un nivel de aspiración (*target*). Un objetivo es una característica medible del problema que puede relacionarse con las variables de decisión. Un nivel de aspiración es un valor que sea satisfactorio para el centro decisor.

Los métodos de **Programación por metas** (GP) intentan minimizar las desviaciones entre los niveles de aspiración explicitados y lo que es posible alcanzar. GP está muy adaptada a los procesos de decisión con metas explícitas de tipo ambiental o socio-económico. Las desviaciones de la meta son ponderadas y acumuladas en una función objetivo. En función de las ponderaciones y de la noción de

---

distancia empleada hay algunas variantes de GP conocidas como programación por metas lexicográficas y la programación por metas ponderadas.

La programación por metas está especialmente indicada para la gestión de usos naturales. Por ejemplo, un problema de gestión de una finca de monte con aprovechamiento cinegético y con aprovechamiento maderero puede plantearse como:

$$\begin{aligned} & \text{Min } [w_1 (n_1 + p_1) + w_2 (n_2 + p_2)] \\ & a_{11} x_1 + a_{12} x_{12} + \dots + a_{1n} x_n + n_1 - p_1 = t_1 \\ & a_{21} x_1 + a_{22} x_{22} + \dots + a_{2n} x_n + n_2 - p_2 = t_2 \\ & \text{resto de restricciones} \end{aligned}$$

donde  $n_1$ ,  $p_1$  = desviación (positiva o negativa) de ciervos cazados sobre la meta de « $t_1$ » animales/año, y  $n_2$ ,  $p_2$  son desviaciones del volumen de madera talado en función del objetivo « $t_2$ » marcado por un plan director a largo plazo. El plan nos daría el nivel de  $x_1, \dots, x_n$ , que son las variables decisión (superficie de pastos, etc.) que permiten el plan que más se acerca a ambas metas. Para ver una aplicación de la programación por metas en agricultura y recursos naturales, ver Romero y Rehman (1989) o Berbel (1992).

La **Programación Multiobjetivo** (*Multiobjective Programming* o MOP) intenta resolver la optimización simultánea de varios objetivos sometidos a un conjunto de restricciones. MOP intenta encontrar *soluciones eficientes*, los elementos de este conjunto son las soluciones alcanzables tales que no haya ninguna otra solución que, alcanzando el mismo nivel para todos los objetivos menos uno, obtenga un mejor resultado para el objetivo restante.

Hay cuatro enfoques para generar el conjunto eficiente: el método de las ponderaciones, el método de las restricciones, el NISE y el simplex multicriterio. El método de las ponderaciones genera el conjunto eficiente mediante la creación de una función objetivo artificial, que es una combinación lineal de los objetivos individuales; mediante los cambios sucesivos de las ponderaciones se obtiene el conjunto eficiente completo. El método de las restricciones parametriza una restricción artificial de uno o varios objetivos optimizando

simultáneamente el restante. Para una comprensión detallada de estos métodos, véase Romero y Rehman (1989).

Uno de los métodos más empleados para generar el conjunto eficiente es el NISE (Non Inferior Estimation Set) (Cohon, 1979). Este método tiene semejanzas con el de las ponderaciones, pero en su uso la ponderación asociada a cada objetivo viene determinada por la pendiente que tenemos entre los puntos ya conocidos previamente.

La programación compromiso (CP), propuesta por Zeleny (1973), se basa en el concepto de **ideal**, que es un punto, generalmente inalcanzable, y definido por los valores de los óptimos individuales de cada objetivo en consideración. La CP se desarrolló para ayudar al centro decisor a escoger una solución. Romero et al (1987) aplicaron la CP a la planificación agrícola, y Romero (1989) muestra una aplicación a la planificación forestal.

La programación **interactiva** multicriterio consiste en una articulación de las preferencias del centro decisor de forma progresiva, por medio de una interacción entre él y el modelo. El proceso toma la forma de un análisis progresivo del nivel de conflicto (trade-offs) entre objetivos de forma interactiva e iterativa, hasta que el centro decisor encuentra una solución que le es satisfactoria. El esquema general del proceso incluye dos roles, el centro decisor, y el analista que cuenta con la ayuda de un modelo.

Normalmente, el analista obtiene una **solución inicial** a partir del modelo, y se la presenta al centro decisor, quien explicita sus preferencias con respecto a la solución presentada por el analista. Estas preferencias locales sirven al analista como una guía para buscar una nueva solución. Esta nueva solución se genera y presenta de nuevo al decisor, el proceso continúa hasta que la solución se considera por el centro decisor como satisfactoria para detener el proceso de búsqueda.

Los métodos interactivos se clasifican fundamentalmente de acuerdo con la forma en que el diálogo entre el centro decisor y el modelo se lleva a cabo. El método **STEM** (Benayoun et al., 1971) parte del **ideal** (el punto definido en la Programación Compromiso). Se le presenta al centro decisor la solución más cercana al ideal (en un sentido minimax); comparando esta solución con el vector ideal, el decisor escoge si es aceptable; en ese caso, la búsqueda se detiene.

---

Si el centro decisor no está satisfecho, él debe decidir qué atributo(s) de la solución puede empeorarse, y cuál(es) debe mejorar. El decisor también indicará la degradación admisible para los objetivos secundarios en esta nueva interacción. La información impone restricciones adicionales al problema, y nuevas ponderaciones se asocian a los objetivos. El proceso se detiene cuando el decisor no tiene interés en empeorar ningún objetivo para mejorar otro.

Zionts and Wallenius (1980) propusieron un método basado en una aproximación local de la función de utilidad del decisor, que se supone que es una combinación lineal de los objetivos considerados en el modelo. Las ponderaciones asociadas a cada objetivo no se conocen explícitamente y la base de este método es procesar un conjunto diferente de ponderaciones hasta que el centro decisor está satisfecho con una solución.

Hay otros métodos como la **Programación por metas interactiva** *Interactive Multiple Goal Programming (IMGP)* propuesta por Nijkamp y Spronk (1980) y por Spronk (1981). El propósito de IMGMP es obtener las metas o niveles de aspiración del centro decisor de forma interactiva. Hay otras técnicas dentro de los métodos multicriterio interactivos como el método **Surrogate Worth Trade-off**, muy empleado en planificación de recursos hídricos, o el **Interactive Weighted Tchebycheff Procedure** (Steuer y Choo, 1983), entre otros. Para una revisión reciente de estas técnicas, se puede consultar Romero y Rehman (1989), y para una evaluación crítica de la base metodológica de los mismos, White (1983) y French (1984).

El último de los enfoques aplicados a la gestión de recursos naturales desde una óptica multicriterio es la **función de utilidad multiatributo** *Multiattribute Utility Function (MUF)*, que se emplea para elecciones de tipo discreto. Asumiendo que el decisor tiene una función de utilidad multiatributo, se realiza una ordenación del número finito de alternativas. Las hipótesis hechas por MUF con respecto a los axiomas de comparabilidad han llevado al desarrollo del método **ELECTRE** (Elimination and Choice Translating Algorithm), Roy (1968).

Romero y Rehman (1987) hicieron una revisión muy extensa de las aplicaciones de técnicas multicriterio a los recursos naturales. Una actualización de las aplicaciones de la programación multicrite-

---

rio a la planificación de recursos naturales puede verse en Berbel y Zamora (1992), que resumiremos en el cuadro 1. En este cuadro se intenta analizar las tendencias en técnicas y las aplicaciones a los distintos campos en los que hemos dividido el problema de la gestión de los recursos naturales.

Como puede verse, la aplicación de técnicas interactivas es el grupo menos numeroso de los métodos multicriterio empleados.

#### IV. FORMULACION DEL PROBLEMA

Vamos a desarrollar un ejemplo ilustrativo basado en un modelo muy simplificado de la realidad. Los datos están basados en una zona representativa del sur de España, pero no se refieren a un caso real, sin embargo son bastante representativos de un ecosistema mediterráneo. Algunas cifras, como el valor económico que genera la caza, están basadas en los precios de los cotos de nuestro entorno. Es interesante comentar que, nuestra experiencia nos indica que la renta que obtienen las fincas de Andalucía por la caza oscilan entre el 10% y el 100%, con una media del 20% de los ingresos brutos. La selección de los objetivos se inspira en el Plan Forestal Andaluz.

*Cuadro 1*  
REVISION DE APLICACIONES DE LA PROGRAMACION MULTICRITERIO  
A LA GESTION DE RECURSOS NATURALES

	<i>Programación por metas</i>	<i>Programación Multiobjetivo</i>	<i>Métodos Interactivos</i>	<i>Métodos Discretos</i>	<i>General</i>
Pesca	R= 6 B= 1	R= 4 B= 0	R= 1 B= 0	R= 3 B= 0	R= 2 B= 0
Agricultura	R= 11 B= 5	R= 6 B= 5	R= 1 B= 1	R= 0 B= 13	R= 3 B= 16
Forestal	R= 19 B= 4	R= 7 B= 6	R= 4 B= 1	R= 2 B= 5	R= 1 B= 0
Recursos hídricos	R= 8 B= 2	R= 21 B= 3	R= 19 B= 0	R= 12 B= 10	R= 18 B= 0
General	R= 0 B= 1	R= 0 B= 1	R= 0 B= 0	R= 1 B= 3	R= 3 B= 1

*Nota:* R= Revisión hecha por Romero y Rehman (1987). B= Revisión hecha por Berbel (1990).

Una vez que se explicitan objetivos, metas y restricciones, el paso siguiente es generar la curva eficiente. Esto se ha resuelto con el uso del programa HIPERLINDO (c) (Schrage, 1986) y aplicando la técnica NISE (Cohon, 1979) para generar el conjunto eficiente cuando el número de objetivos es menor de tres, o recurriendo a algún algoritmo de generación y filtrado cuando el número de objetivos supera a cuatro. El problema puede esquematizarse como puede apreciarse en el cuadro 2.

Podemos ver que hay cuatro tipos de suelo, cada uno con un área total de 25.000 Has (restricciones 5 a 8).

- Area 1: relieve llano y suelo profundo.
- Area 2: ondulado, suelo con profundidad media.
- Area 3: ondulado, suelo pobre.
- Area 4: pendiente acusada, suelo pobre.

Dentro de esas áreas hay cuatro usos posibles del suelo:

- Uso 1: Agricultura ( $X_{1,*}$ )
- Uso 2: Mixto: agricultura y ganadería ( $X_{2,*}$ )
- Uso 3: Forestal ( $X_{3,*}$ )
- Uso 4: Conservación y recreativo ( $X_{4,*}$ )

Cuadro 2

MODELO COMPLETO	
EFFICIENT (VA, VIS, SLOSS)	
SUBJECT TO	
2)	$X_{31} + X_{32} + X_{33} + X_{34} + 4 X_{41} + 4 X_{42} + 4 X_{43} + 4 X_{44} - X_5 = 0$
3)	$0.3 X_{21} + 0.3 X_{22} + 0.3 X_{23} + 0.3 X_{24} + 1.8 X_{31} + 1.8 X_{32} + 1.8 X_{33} + 1.8 X_{34} + 0.9 X_{41} + 0.9 X_{42} + 0.9 X_{43} + 0.9 X_{44} - X_6 = 0$
4)	$X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + 0.5 X_{21} + 0.5 X_{22} + 0.5 X_{23} + 0.5 X_{24} + 0.25 X_{31} + 0.25 X_{32} + 0.25 X_{33} + 0.25 X_{34} + 0.1 X_{41} + 0.1 X_{42} + 0.1 X_{43} + 0.1 X_{44} - X_7 = 0$
5)	$X_{11} + X_{21} + X_{31} + X_{41} \leq 25000$
6)	$X_{12} + X_{22} + X_{32} + X_{42} \leq 25000$
7)	$X_{13} + X_{23} + X_{33} + X_{43} \leq 25000$
8)	$X_{14} + X_{24} + X_{34} + X_{44} \leq 25000$
9)	$X_5 + X_6 + X_7 - VIS = 0$
10)	$25 X_{11} + 35 X_{12} + 45 X_{13} + 75 X_{14} + 2.5 X_{21} + 3.5 X_{22} + 4.5 X_{23} + 7.5 X_{24} + 0.25 X_{31} + 0.35 X_{32} + 0.45 X_{33} + 0.75 X_{34} - SLOSS = 0$
11)	$-VA + 60 X_{11} + 40 X_{12} + 20 X_{13} + 5 X_{14} + 40 X_{21} + 30 X_{22} + 20 X_{23} + 10 X_{24} + 10 X_{31} + 6 X_{32} + 4 X_{33} + 2 X_{34} + X_{41} + X_{42} + X_{43} + X_{44} + 2 X_5 + 7 X_6 + 3 X_7 = 0$
END	

donde (\*) se refiere a  $j= 1, 2, 3$  y  $4$ , es decir al tipo de suelo donde se desarrollaría la actividad, y que se han definido en el párrafo anterior.

Hay tres tipos de visitantes, y la capacidad de número de visitantes total está relacionada con el uso del suelo (eq. 2 a 4).

- X5: paseo y acampada
- X6: caza mayor
- X7: caza menor

Por último hay tres objetivos:

- VA: valor añadido (depende del uso del suelo y del número de visitantes) (eq. 11)
- VIS: número de visitantes, que es maximizado (eq. 10)
- SLOSS: erosión, que se minimiza (eq. 9)

## V. EL METODO STEM

Hemos comentado anteriormente la existencia de varios métodos interactivos, algunos de los cuales son muy sencillos de aplicar por el analista, como el comentado de Ziont y Wallenius; sin embargo, nos hemos inclinado por el método STEM porque el centro decisor tiene una visión más clara de lo que está ocurriendo en el proceso de decisión. Esto es así porque se trabaja directamente sobre los niveles alcanzados por los objetivos, y no sobre otras magnitudes como ocurre en los otros métodos interactivos comentados.

El método **STEM** parte del punto *ideal*, definido por los óptimos independientes para cada objetivo (como en CP). El decisor se encuentra con la solución más cercana al ideal en un sentido minimax; comparando esta solución con el vector ideal el decisor estudia si es aceptable, en ese caso, la búsqueda cesa. En nuestro caso, el ideal es definido por la matriz de pay-off. El punto A define el valor añadido máximo, mientras el punto B define el óptimo al minimizar erosión y maximizar el número de visitantes. El hecho de que coincidan estos dos últimos óptimos nos indica que, en nuestro ejemplo concreto, los objetivos sociales y ecológicos están muy relacionados (ver cuadro 3).

---

Cuadro 3

MATRIZ DE PAY-OFF

Objective	Solución «A»	Solución «B»
VALOR AÑADIDO .....	3.673.750	1.560.000
NUMERO DE VISITANTES .....	146.250	500.000
EROSION TOTAL .....	1.631.250	0

Nota: Solución «A»: Óptimo independiente para VALOR AÑADIDO; Solución «B»: Idem para VISITANTES y EROSION.

El **Ideal**, según se deduce del cuadro 3, es:

$$(3.673.750, 500.000, 0).$$

El segundo paso del método es encontrar la solución más próxima al ideal en un sentido minimax, lo que se resuelve mediante el programa:

Min D

sujeto a:

$$\left| \frac{Z_i^*(x) - Z_i(x)}{Z_i^*(x) - X_{*i}(x)} \right| \leq D \quad i=1, 2, 3$$

$X \in x$  (Restricciones básicas)

donde el subíndice (\*) indica el anti-ideal y el superíndice (\*) indica el ideal para cada criterio.

$$\begin{aligned} &\min d \\ &\text{subject to} \\ &0.14330 (3.673.750 - va) \leq d \\ &0.961637 (500.000 - vis) \leq d \\ &0.204033 sloss \leq d \end{aligned}$$

y las restricciones (2) a (11) del problema original.

La solución de este programa es:

$$Pl = (1.829.076, 472.540, 109.987)$$


---

Esta solución no es aceptable para el centro decisor en términos de valor añadido, pero está bastante cerca del ideal para erosión y visitantes. El decisor quiere mejorar el objetivo de VA, lo que se consigue permitiendo una disminución del nivel de erosión y de visitantes. Esto se hace limitando los visitantes a un mínimo de 300.000 y la erosión a un máximo de 1.500.000. Con estos datos tenemos la segunda solución:

$$P2 = (3.430.000, 300.000, 1.500.000)$$

En esta iteración, el valor anadido ha mejorado considerablemente, de manera que el decisor escoge reducir la erosión, lo que se hará a costa de reducir algo el valor anadido. Tras dos iteraciones más, el resultado es:

$$P3 = (3.300.000, 300.000, 1.098.654)$$

$$P4 = (3.000.000, 300.000, 514.116)$$

Como vemos, a partir de P3, el decisor escoge minimizar la erosión reduciendo el valor anadido en un 10%.

## VI. GENERACION DEL CONJUNTO EFICIENTE

Realmente el método STEM no requiere de ningún apoyo gráfico ni está limitado a problemas bi-criterio. Sin embargo, dada la naturaleza ilustrativa de este trabajo, hemos querido mostrar cuál ha sido el proceso seguido por el centro decisor.

Para ello hemos generado los conjuntos eficientes bicriterio: valor añadido-visitantes; valor anadido-erosión y visitantes-erosión. Al generarlos, y en este problema en concreto, salta a la vista la relación estrecha entre minimizar la erosión y maximizar el uso recreativo; de hecho, el óptimo para cada objetivo individualmente optimizado es el mismo. Por ello, y para este caso particular, hemos optado por agrupar ambos objetivos en uno solo que combine los dos criterios erosión y visitantes.

---

Hemos fabricado una variable artificial llamada «suma ecosociológica» que se forma por la suma lineal del valor de la erosión y de los visitantes. Esto es posible, insistimos, por estar los dos objetivos estrechamente ligados. Se ha hecho una proyección de los tres objetivos en el espacio bi-criterio artificial «valor añadido vs suma ecosociológica» que se muestra en el gráfico 1. Después de esta operación, procedimos a dibujar las sucesivas iteraciones del proceso STEM, mostrando la senda hacia el punto P4, donde se detuvo la búsqueda. La tabla 4 recoge toda la información numérica (ver cuadro 4 y gráfico 1).

Como puede verse, el empleo de las técnicas multicriterio permite una profundidad de análisis muy interesante. La simple generación del conjunto eficiente es lo suficientemente enriquecedora como para permitir una toma de decisiones mucho más razonada. Si queremos ver qué efecto tiene las soluciones suministradas por el método STEM a la planificación del territorio, podemos tener una representación de la misma en el gráfico 2.

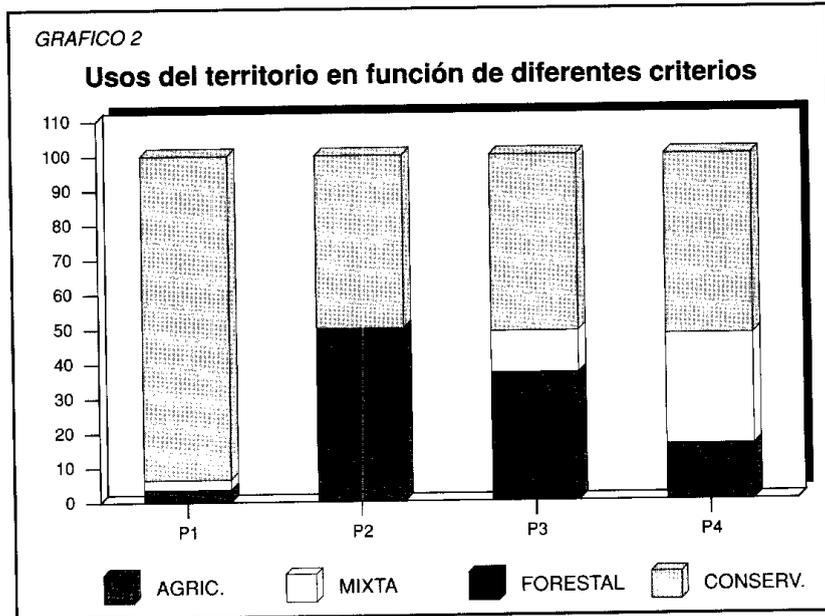
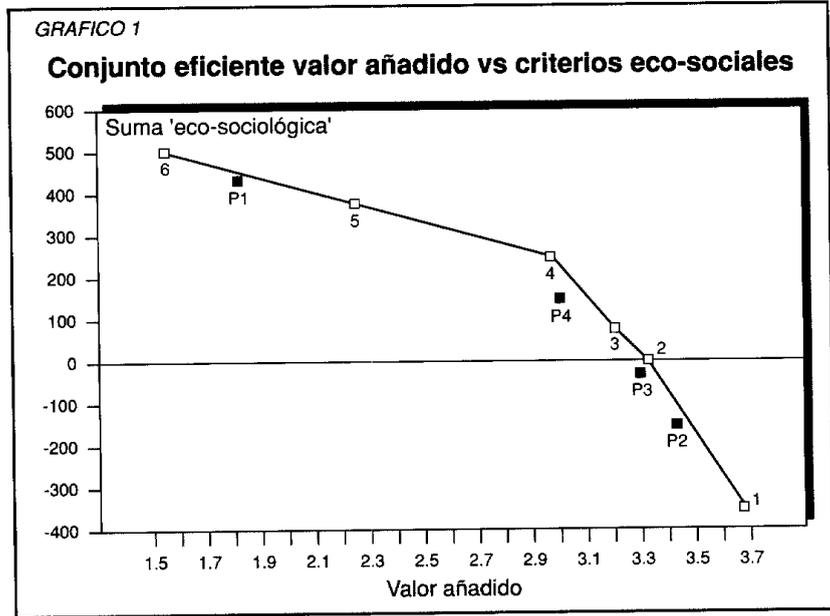
En esta figura vemos que cuando el objetivo eco-social es el predominante (P1), la mayor parte del territorio tiene un uso conserva-

Cuadro 4

## ALGUNAS SOLUCIONES EFICIENTES

Punto/Objet.	Valor Añadido	Visitantes	Erosión	«Suma eco-sociológica»
1	3.673.750	146.250	1.631.250	(343.125)
2	3.324.473	227.337	757.792	(1)
3	3.195.000	295.000	712.500	81.250
4	2.970.000	290.000	150.000	245.000
5	2.260.000	395.000	62.500	376.250
6	1.560.000	500.000	0	500.000
X1	1.829.076	472.540	109.987	439.544
X2	3.430.000	300.000	1.500.000	(150.000)
X3	3.300.000	300.000	1.098.654	(29.596)
X4	3.000.000	300.000	514.116	145.765

Punto/Área (has)	Agricultura	Mixta	Forestal	Conservacional y Recreacional
P1	4.139	2.603	0	93.258
P2	50.000	0	0	50.000
P3	37.326	12.071	0	50.603
P4	16.432	31.970	0	51.598



cionista, mientras que, en el otro extremo (P2), el territorio se divide al 50% entre agrícola y conservacionista, obviamente asignando al uso agrícola las tierras de mayor vocación para cultivos, y dejando para el uso conservacionista las tierras más sensibles a la erosión y menos rentables para el cultivo.

## VII. CONCLUSIONES

El presente artículo intenta aplicar las técnicas de decisión multicriterio a un problema simplificado de las condiciones españolas de zonas agroforestales. Se aplican técnicas de decisión interactivas a un modelo que representa de manera simplificada un área de 100.000 Has, con cuatro tipos de terreno (de 25.000 Has cada uno), cuatro usos posibles y tres objetivos aparentemente en conflicto.

Tras revisar las técnicas multicriterio (MCDM) utilizamos el método STEM dentro de las posibles técnicas interactivas como la más adecuada para el ejemplo. Queda demostrada la utilidad de los métodos interactivos multicriterio para centros decisores que deseen estudiar el conflicto y compatibilidad entre objetivos. También una gran ventaja de los métodos multicriterio es su sencillez de implementación.

## BIBLIOGRAFIA

BERBEL, J. y ZAMORA, R. (1992). *Natural Resources Management: An interactive multiple criteria decision making approach*. XXIV Seminario de la Asociación Europea de Economistas Agrarios: «Gestión de recursos naturales». Viterbo (Italia) (265-272).

BERBEL, J. (1992). *Gestión de explotaciones cinegéticas (ciervos) en Sierra Morena: influencia de la tasa de interés*. Investigación Agraria. Economía, 7 (1), (1-9).

BENAYOUN, R. J.; DE MONGOLFIER, J. T. y TERGNY y LARITCHEV, O. (1971). *Linear Programming with Multiple Objective Functions: Step Method (STEM)*. Mathematical Programming 1 (366-375).

CHRISTODOULOU, M. y NAKOS, G. (1990). *An Approach to Comprehensive Land Use Planning*. Journal of Environmental Management, 31 (39-46).

---

- COHON, J. L. (1979). *Generating Multiobjective Trade-Offs: An Algorithm for Bicriteria Problems*. Water Resources Research, 15 (1.001-10).
- FRENCH, S. (1984). *Interactive Multiobjective Programming: Aims, Applications and Demands*. J. Oper. Res. Soc., 35 (827-834).
- HAIMES, Y. Y. y HALL, W. A. (1974). *Multiobjectives in Water Resources Systems Analysis: the Surrogate Worth Trade-off Method*. Water Resources Research, 10 (615-624).
- NIJKAMP, P. y SPRONK, J. (1980). *Interactive Multiple Goal Programming: an Evaluation and some Results*. Ricerca Operativa (33-49).
- ROMERO, C. (1989). *Modelos de planificación forestal: una aproximación desde el análisis multicriterio*. Revista de Estudios Agrosociales, n.º 147 (enero-marzo 1989).
- ROMERO, C.; AMADOR, F. y BARCO, A. (1987). *Multiple Objectives in Agricultural Planning: a Compromise Programming Application*. Amer. J. Agric. Econ., 69 (78-86).
- ROMERO, C. y REHMAN, T. (1987). *Natural Resources Management and the Use of Multiple Criteria Decision-Making Techniques: a Review*. Eur. R. Agric. Econ., 14 (61-89).
- ROMERO, C. y RECHMAN, T. (1989). *Multiple Criteria Analysis for Agricultural Decisions*. Elsevier, Amsterdam.
- ROY, B. (1968). *Classement et Choix en Presence de Points de Vue Multiples (La Methode ELECTRE)*. Revue Française d'Informatique et de Recherche Operationnelle, 8 (57-75).
- SCHRAGE, L. (1986). *Linear, Integer and Quadratic Programming with LINDO*. The Scientific Press. Chicago.
- SPRONK, J. (1981). *Interactive Multiple Goal Programming*. Martinus Nijhoff Publishing, Boston.
- STEUER, R. E. y CHOO, E. (1983). *The Foundations of Multi-Objective Interactive Programming: Some Questions*. In HANSEN, P. (ed.) *Essays and Surveys on Multiple Criteria Decision Making* (406-414). Springer-Verlag, Berlin.
- ZADNIK STIRN, L. (1990). *Adaptive dynamic model for optimal forest management*. Forest Ecology and Management, 31 (167-188).
- ZIONTS, S. y WALLENUS, J. (1980). *An Interactive Programming Method for Solving Multiple Criteria Problems*. Management Science, 22 (652-663).
- ZELENY, M. (1973). *Compromise Programming*. In COCHRANE, J. L. (ed.) *Multiple Criteria Decision Making* (262-301). Columbia Univ. of South Carolina Press.

## RESUMEN

El presente trabajo tiene carácter divulgativo intentando mostrar las posibilidades de la teoría de la decisión multicriterio en la planificación del uso del territorio. Se aplican técnicas multicriterio interactivas a un modelo que trata de un problema simplificado y representativo de las condiciones de las zonas agroforestales y del Sur de España.

---

**R E S U M E**

Ce travail a un caractère de vulgarisation et prétend montrer les possibilités qu'offre la théorie de la décision fondée sur des critères multiples dans la planification de l'utilisation du territoire. Il est appliqué ces techniques interactives fondées sur des critères multiples à un modèle portant sur un problème simplifié et représentatif des conditions des zones agricoles et forestières du sud de l'Espagne.

**S U M M A R Y**

This is a general information paper which aims to show the possibilities of multiple criteria decision making in land-use planning. Interactive multiple criteria techniques are applied to a model focusing on a simplified problem which is representative of the conditions prevailing in agroforestry areas in southern Spain.

---