

TECNICAS MULTICRITERIO DISCRETAS EN LA PLANIFICACION DE CUENCAS FLUVIALES*

María Teresa Escobar Urmeneta
José María Moreno Jiménez

*Departamento Métodos Estadísticos
Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales
Universidad de Zaragoza*

RESUMEN

El presente trabajo revisa distintas Técnicas Multicriterio Discretas utilizadas en la evaluación y selección entre alternativas en uno de los problemas más estudiados en el ámbito de la Gestión de Recursos Naturales, el de la planificación de la cuenca del río Tisza.

Así mismo, el trabajo presenta una nueva modelización del problema, basada en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), e incluye un análisis de sensibilidad de la misma, cuyos resultados son comparados con los anteriores estudios postóptimos llevados a cabo en las restantes técnicas multicriterio aplicadas a este problema (Teoría de Utilidad Multiatributo (MAUT), Métodos de Superación (MS) y Proceso Analítico Jerárquico (AHP)).

Palabras Claves: Gestión de Recursos Naturales, Técnicas Multicriterio Discretas, MAUT, AHP, Métodos de Superación (*outranking*).

1. INTRODUCCION

Dentro del campo de la Ecología, una de las áreas a la que más atención se está prestando en los últimos tiempos es la Gestión de Recursos Naturales (GRN), entendiendo como tal la utilización apropiada de estos recursos en la búsqueda del bienestar social.

Esta meta global tan amplia requiere para su modelización la incorporación, junto a los tradicionales aspectos económicos, de otros aspectos o criterios hasta el momento no contemplados, que, como los Sociales y Ambientales, permiten un mayor realismo en la aproximación seguida al recoger otros aspectos relevantes del problema.

Existen numerosas clasificaciones de las diferentes metodologías utilizadas en los estudios de Impacto Ambiental (Dickett, Heer y Hagerty, Warner y Bromley entre otros). No obstante, en los estudios prácticos de GRN se suelen aplicar metodologías "a medida" desarrolladas a partir de tres principios básicos:

1. Análisis del proyecto.
2. Valoración y Selección.
3. Establecimiento de Medidas Correctoras y Control.

Este trabajo se centra fundamentalmente en la segunda fase, dónde se presen-

tan dos problemas destacados: el primero es la medición del impacto, tanto ambiental como social, ya que en ambos casos las escalas utilizadas suelen ser cualitativas; y el segundo, la agregación de medidas en diferentes escalas que no tienen porqué ser numéricas.

Respecto a la forma de resolver los modelos que incorporan diferentes criterios, normalmente en conflicto, se suele recurrir o bien a los Modelos Generales de Selección entre alternativas (Gómez Orea 1992; Heer y Hagerty 1977; Hunsaker y Carpenter 1990; MOPU 1990), o bien a los enfoques multicriterio (Keeney y Raiffa 1976; Roy 1968, 1985; Saaty 1977, 1980).

A continuación se revisan las distintas técnicas multicriterio aplicadas a uno de los problemas más estudiados en Gestión de Recursos Naturales, el ejemplo propuesto por David y Duckstein (1976) relativo a la planificación de cuencas fluviales.

El trabajo se estructura de la siguiente forma: en el apartado segundo se plantea el problema de Planificación del río Tisza. En el tercero se recogen los aspectos teóricos básicos de las técnicas multicriterio aplicadas en la GRN y en particular al problema de planificación del río Tisza. El apartado cuarto presenta una nueva modelización del problema, utilizando AHP, en la que se adecúa el modelo propuesto por Escobar y Moreno (1993) a la importancia relativa que los distintos criterios han tenido en los anteriores estudios del mismo. Este apartado incluye el análisis postoptimal del modelo AHP propuesto, incidiendo especialmente en el estudio del cambio de rango, y un análisis comparativo frente a los restantes estudios potoptimales realizados. En el último se recogen las conclusiones más importantes de este trabajo.

2. PLANIFICACION DEL RIO TISZA

El río Tisza, afluente por la izquierda del Danubio, nace en los Cárpatos ucranianos al pie del macizo de Goverla y tiene una longitud de 997 Km. El Tisza se presenta como un río de llanura a lo largo de los 650 Km. que transcurren por Hungría, donde su cuenca (de unos 30.000 Km²) se encuentra a poco más de 100 m. de altitud. Su régimen hidrológico (4.200 m³s. en periodos de crecida y menos de 100 m³s. a finales de verano) está determinado por sus orígenes montañosos. Sus crecidas son violentas y ocurren en épocas de deshielo, y a veces tras las tormentas de verano, siendo especialmente peligrosas en el NE de Hungría donde provoca frecuentes rupturas y cambios de cauce, poniendo en movimiento considerables cantidades de limo.

Para luchar contra las inundaciones se emprendieron, desde la segunda mitad del siglo XIX, grandes proyectos de construcción de diques. En este sentido el presente trabajo aborda el problema de decisión consistente en la selección del mejor proyecto de desarrollo de la cuenca del río Tisza a su paso por Hungría. En el problema se consideran cinco alternativas o proyectos y doce criterios que se detallan a continuación.

Las cinco alternativas o proyectos son los siguientes:

Proyecto I: Trasvase Danubio-Tisza mediante un sistema embalse-canal.

Con este sistema se aprovecharían los recursos de los ríos Tisza y Danubio. El agua sería trasvasada durante todo el año desde el Danubio al río Tisza en dos puntos: en la llanura mediante un canal que aprovechara la fuerza de gravedad y en el macizo de Börzsöny-Cserhát con la construcción de un embalse y un canal de bombeo.

Proyecto II: Embalse en el Noreste de la región.

Este embalse, conteniendo agua bombeada, sólo se alimentaría del río Tisza. Se construiría en la región montañosa de Satoros y Bükk y el suministro natural de agua estaría disponible solamente durante 4 ó 5 meses al año.

Proyecto III: Sistema de embalses en la llanura.

Se construiría un conjunto de embalses en la parte llana de la región, dónde se encuentran la mayor parte de los sistemas de aprovechamiento de recursos acuíferos ya existentes. Estos embalses contendrían agua del río Tisza y serían poco profundos (de 2 a 4 m. de profundidad). El área total disponible para la construcción de dichos embalses es solamente de 5,5 Km².

Proyecto IV: Embalse en la zona montañosa de la cuenca del río Tisza.

Este embalse sería construido fuera de Hungría, por lo que sería necesaria una excelente cooperación internacional. Dicho embalse utilizaría y regularía los recursos del río Tisza aprovechando la fuerza de la gravedad.

Proyecto V: Sistema de almacenamiento subterráneo de agua.

Este sistema se desarrollaría principalmente en la parte llana de la región, especialmente en la parte más al este. Se alimentaría de agua del río Tisza y de los

acuíferos terrestres que formarían espacios de almacenamiento bajo tierra, aunque éstos están limitados.

La HNWA (Hungarian National Water Authority) estableció una serie de objetivos generales (OG) o estratégicos que después se concretaron en criterios. Estos objetivos eran los siguientes:

OG-1 Requisitos de agua: Satisfacer la demanda en cuanto a cantidad y calidad del agua en el espacio y en el tiempo.

OG-2 Protección de riadas: El sistema que se implante debe proporcionar protección a lo largo del río Tisza y sus afluentes al menos para un periodo de 50 años, es decir, hasta el año 2.030 cuando se espera haya una población de 3,5 millones de personas viviendo en la zona. El problema principal para la consecución de esta meta es que las riadas se originan fuera del sistema.

OG-3 Drenaje y disposición de agua utilizada: Debería ser posible drenar un área media de 15.000 Km² en 10 días. El uso y reuso eficiente del agua están incluidos en este objetivo general.

OG-4 Utilización de recursos: Los recursos de tipo natural, social y económico necesarios para implementar el sistema deben contenerse al mínimo mientras que los recursos del río Tisza deben utilizarse lo más posible. Los tipos de recursos considerados en este estudio son: agua, energía, suelo, bosque, capital y mano de obra.

OG-5 Impacto ambiental: Minimizar el impacto que la construcción de embalses, redes de canales y bombeo de acuíferos tienen sobre el medio ambiente (ecología y valores estéticos).

OG-6 Flexibilidad: El sistema propuesto debe ser lo suficientemente flexible para abordar un amplio espectro de futuros requisitos, muchos de los cuales no pueden preverse en el presente.

Estos objetivos generales se concretan en los siguientes criterios (C):

C1 -Costes: Suma de costes de ejecución del proyecto y costes asociados a las pérdidas. Se considera el coste total anual descontado (se mide en 10⁹ forints/año).

C2 -Probabilidad de escasez: Como el principal propósito es proporcionar agua, la probabilidad de escasez se considera como un criterio por sí mismo. Pero la sola utilización de pérdidas por escasez esperada es inadecuada para expresar la

importancia en la satisfacción de la demanda. (Se mide en %).

C3 -Calidad del agua: Impacto ambiental y social en la calidad del agua incluyendo la disposición de agua sobrante. Los valores que toma este criterio son: Muy Buena, Buena, Normal y Mala.

C4 -Energía: Porcentaje de energía producida en horas punta con respecto a la energía total consumida. También se incluye como un término más del coste total medido como pérdida de oportunidad.

C5 -Posibilidades de recreo: Depende de la superficie regada (a más superficie mayores posibilidades de recreo existen).

C6 -Protección de riadas: Este criterio contiene una componente monetaria y una social. La primera incluye los costes de lucha contra las riadas y la segunda el impacto de la cooperación internacional. A partir de la probabilidad de que ocurra una riada se ha dado una valoración Excelente, Buena, Normal, Mala o Muy Mala a las distintas alternativas.

C7 -Ocupación de superficie: La utilización de recursos de suelo y forestales se mide en pérdida monetaria pero como también tiene un valor social, se incluye este criterio expresado por el área ocupada (en miles de hectáreas).

C8 -Impacto en el empleo: Mano de obra utilizada. Se valora como Muy Buena, Buena o Normal.

C9 -Impacto ambiental: La calidad de la arquitectura ambiental. Puede tomar los valores Muy Bueno, Bueno, Normal o Malo.

C10 -Cooperación Internacional: Debería ser posible unir el proyecto elegido con cualquier otro proyecto implantado en el futuro en una región vecina. Para ello ha de ser necesaria la cooperación internacional, que puede clasificarse como Muy Fácil, Fácil, Ligeramente Difícil y Difícil.

C11 -Posibilidades de desarrollo: Capacidad de resistir los cambios requeridos. Valores: Muy Bueno, Bueno, Normal y Malo.

C12 -Sensibilidad a datos: Robustez del proyecto frente a diversas incertidumbres (predicción, políticas futuras desconocidas, económica, incremento de la tecnología). Valores: No Sensible, Sensible, Muy Sensible.

Los valores que toman las alternativas para los distintos criterios se reflejan en la Tabla 1 que se presenta a continuación.

CRITERIOS	ALTERNATIVAS				
	I	II	III	IV	V
C1 - Costes	99.6	85.7	101.1	95.1	101.8
C2 - Probabilidad de escasez	4	19	50	50	50
C3 - Calidad de agua	MB	B	M	MB	N
C4 - Energía (reuso)	0.70	0.50	0.01	0.10	0.01
C5 - Posibilidades recreo	MB	B	N	M	M
C6 - Protección riadas	B	E	N	E	M
C7 - Ocupación superficie	90	80	80	60	70
C8 - Impacto empleo	MB	MB	B	N	N
C9 - Impacto ambiental	MB	B	M	B	N
C10 - Coop. internacional	MF	F	LD	D	LD
C11 - Posibilidades desarrollo	MB	B	N	M	N
C12 - Sensibilidad del proyecto	NS	NS	MS	S	MS

dónde MF=Muy Fácil, F=Fácil, D=Difícil, LD=Lig. Difícil, MB=Muy Bueno, B=Bueno, N=Normal, M=Malo, E=Excelente, NS=No Sensible, S=Sensible, MS=Muy Sensible.

Tabla 1 - Datos del problema (río Tisza)

3. ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LAS APROXIMACIONES MULTICRITERIO UTILIZADAS EN LA GRN

Las Técnicas de Decisión Multicriterio (TDMC), son un conjunto de procedimientos que abordan el problema de decisión de una forma más realista, al permitir la incorporación en el modelo empleado de diferentes criterios, generalmente en conflicto. Esta dificultad suele impedir la obtención de la solución óptima para todos los criterios de forma simultánea, de ahí, que se suele recurrir a la búsqueda de soluciones satisfactorias frente a las óptimas.

Las TDMC se pueden clasificar atendiendo a numerosos criterios. Uno de los más utilizados es el sentido del flujo de información existente entre los dos actores más destacados del Proceso de Toma de Decisiones (PTD), el decisor y el analista. Según este flujo podemos distinguir tres tipos de métodos:

1. Técnicas sin información a priori (generadoras): Son aquellas en las que el flujo de información va del analista al decisor. Con ellas se genera, parcial o total-

mente, el conjunto de alternativas eficientes. Entre estas técnicas destacan: el método de ponderaciones, el de la ϵ -restricción y el simplex multicriterio.

2. Técnicas con información a priori: El flujo de información es en el sentido contrario, del decisor al analista. Dentro de este grupo de técnicas se suele hacer otra distinción según el número de alternativas que tenga el problema: finito o infinito. Si el conjunto de alternativas es infinito se suelen aplicar métodos de Programación por Compromiso o Programación por Metas. Si el conjunto de alternativas es discreto hacemos la siguiente diferenciación:

i) Métodos de Agregación:

- Directos: MAUT
- Jerárquicos: AHP

ii) Métodos basados en relaciones de orden:

- Métodos de Superación ("Surclassement" (francés), "Outranking" (inglés))

3. En el último grupo recogemos aquellas técnicas en las que el flujo de información es en los dos sentidos, dando lugar a las denominadas técnicas interactivas.

Muchos de los métodos anteriormente mencionados pueden considerarse dentro de este último grupo, bastando para ello que el decisor revise sus juicios dentro del PTD.

Centrándonos en las técnicas de Decisión Multicriterio aplicadas a la resolución del problema de la Planificación del río Tisza, señalar:

La Teoría de Utilidad Multiatributo (MAUT) fue desarrollada por Keeney y Raiffa (1976) a partir de la Teoría de Utilidad Unidimensional de Von Neumann y Morgenstern y su dogma central de comportamiento es el principio de racionalidad.

La idea básica que se plantea en este enfoque es el poder expresar las preferencias del decisor sobre un conjunto de atributos o criterios en términos de la utilidad que le reporta. Las fases que se distinguen en la construcción de dicha función de utilidad son las siguientes:

1. Identificación de la forma funcional apropiada.
2. Construcción de las funciones de utilidad unidimensionales.
3. Determinación de los parámetros de la función de utilidad multiatributo.
4. Comprobación de la consistencia de la función de utilidad construida.

En la primera fase se comprueban distintas condiciones que garantizan la descomponibilidad de la función de utilidad multiatributo en funciones de utilidad unidimensionales.

El segundo paso recoge la construcción de estas funciones de utilidad unidimensionales, cuya construcción ya es conocida por la teoría de utilidad de Von Neumann y Morgenstern.

En la tercera fase se determinan los factores de escala o pesos. Una vez obtenidas las funciones de utilidad unidimensionales y los factores de escala se construye la función de utilidad multidimensional aplicando la forma de descomposición determinada en el primer paso.

Tanto para la determinación de la forma de descomposición, como para el cálculo de las funciones de utilidad unidimensionales y los factores de escala se utilizan loterías.

La última fase del proceso consiste en comprobar la consistencia de la función de utilidad construida a partir de los juicios de valor emitidos por el decisor.

El Proceso Analítico Jerárquico (AHP) es una técnica, desarrollada por Saaty (1977, 1980), que permite la resolución de problemas multicriterio, multientorno y multiactores, incorporando en el modelo los aspectos subjetivos y la incertidumbre inherente en el PTD. El proceso seguido en este método consta de tres etapas (Moreno y Vargas 1991):

1. Modelización del problema o construcción de la jerarquía.
2. Emisión de juicios (prioridades locales).
3. Síntesis (prioridades globales).

En la primera etapa se construye un modelo, en este caso una jerarquía que represente el problema de decisión. En el nivel superior se coloca el objetivo o meta final del problema. A continuación se colocan los criterios que se consideran relevantes para la evaluación de las distintas alternativas (último nivel de la jerarquía).

Esta estructura es la más sencilla que se puede construir, pudiendo completarse para adecuarla a la realidad con la inclusión de otros niveles para escenarios, actores, subcriterios, etc.

En la segunda etapa se calculan, a partir de las matrices de comparaciones pareadas emitidas por el decisor, los valores que determinan la importancia relativa

de los elementos de un nivel respecto a un nodo del nivel superior. Estos valores, o escalas, se obtienen al calcular el vector propio principal de la matriz de comparaciones pareadas.

En la tercera y última fase se sintetizan las prioridades locales alcanzadas en la etapa anterior, obteniendo las prioridades globales de cada una de las alternativas en relación a la meta del problema.

Frente a las dos aproximaciones anteriores de la "escuela americana", la denominada (por ellos mismos) "escuela europea" desarrolló, principalmente en Francia, los Métodos de Superación. Estos métodos intentan relajar las rígidas hipótesis del enfoque utilitarista. El proceso seguido consta, en esencia, de dos etapas:

1. Construcción de la relación de superación.
2. Explotación de la relación de superación.

En la primera etapa se construye la relación de superación mediante la agregación y eliminación de preferencias. En la segunda se aprovecha la información contenida en esta relación conforme al propósito u objetivo perseguido (elección, clasificación u ordenación de alternativas).

Los distintos métodos (ELECTRE, PROMETHEE,...) definen las condiciones que deben cumplirse para dar por válida esta relación de superación entre un par de alternativas dado.

Los conceptos básicos utilizados en los métodos ELECTRE son los de concordancia y discordancia (agregación y eliminación). Para dar por válida una relación se tendrán en cuenta los criterios que están a favor de la misma (aquellos criterios para los que el índice de concordancia supere un cierto nivel), pero no se olvida a los criterios que no lo están, estableciendo un umbral (umbral veto) a partir del cuál se rechaza la relación dada.

El grado de significación de cada criterio viene reflejado por dos umbrales: el umbral de indiferencia y el umbral de preferencia; y la información entre-criterios se da a través del ya nombrado umbral veto y el coeficiente de importancia.

Una vez construida la estructura de preferencias dada por las relaciones de superación, ésta se representa mediante un grafo, y se escoge un conjunto de alternativas no dominadas entre sí y que superan a las demás alternativas. Este conjunto es el núcleo del grafo construido.

Los métodos PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod of Enrichment Evaluations) son otro tipo de métodos de superación. Básicamente se siguen tres pasos en su aplicación:

- Enriquecimiento de la estructura de preferencia. Se consideran criterios generalizados que recogen la amplitud de las desviaciones entre criterios. Estos criterios generalizados dependen de una serie de parámetros que tienen una interpretación económica clara.

- Enriquecimiento de la relación de dominancia. Se construye un grafo de superación fuzzy, en el cuál cada arco representa una relación de dominancia entre un par de alternativas, y el valor que se asocia a cada arco representa la intensidad de preferencia de una alternativa sobre la otra cuando se toman como referencia los criterios generalizados construidos en el paso anterior.

- Aprovechamiento de la relación para la Ayuda a la Decisión. El método PROMETHEE I proporciona una relación de orden parcial entre las alternativas, mientras que mediante el método PROMETHEE II se consigue una ordenación total de las mismas.

En cuanto a la aplicación de las TDMC en la GRN señalar que, a pesar de existir estudios teóricos previos, su aplicación a la GRN comienza en los años 70 (David y Duckstein, 1976; Keeney y Wood, 1977; Saaty y Gholamnezhad, 1982) con la gestión de recursos hídricos, donde podemos incluir la Planificación de Cuencas Fluviales, la Gestión de Embalses y la Calidad de Aguas. Otras de las aplicaciones más destacadas son la Planificación y Gestión de las Tierras (Ordenación del Territorio y Planificación Regional), la Gestión de Recursos Vegetales (Recursos Forestales) y Recursos Animales (Recursos Pesqueros), la Gestión de Recursos Energéticos (petróleo, gas, carbón, etc...) y Mineros, y la Conservación del Medio Ambiente (eliminación de residuos, protección del medio natural y del patrimonio rural).

Centrándonos en la planificación de las cuencas fluviales, área a la que corresponde el problema considerado (Planificación del desarrollo de la cuenca del río Tisza, Hungría), las decisiones consideradas buscan la optimización de distintos usos de las aguas del río, o si se prefiere la satisfacción de unas metas relativas a la utilización de sus aguas (suministros urbanos e industriales, obtención de energía eléctrica, usos recreativos, riego agrícola, pesca comercial, control de riadas, y navegación), siendo posibles actuaciones la construcción de presas, depuradoras, centrales hidroeléctricas, instalaciones recreativas y reguladoras, conexiones intercuenas, precios, incentivos fiscales, campañas de formación y persuasión, etc.

Entre los trabajos previos relativos a la aplicación de las Técnicas de Decisión Multicriterio en el desarrollo de cuencas fluviales destacan el de Cohon (1978) quien aplica el método de la ϵ -restricción a un problema en la cuenca del río Colorado (Argentina) y el de David y Duckstein (1976) quienes aplicaron el Método Electre I (métodos de superación) en la planificación del río Tisza (Hungría). Otras aplicaciones multicriterio a este mismo caso son la de Keeney y Wood (1977) quienes aplican la Teoría de Utilidad Multiatributo, la de Szidarowsky et al. (1986) que emplean un método de Programación por Compromiso (distancia de Tchebycheff), la de Barba-Romero (1992) quien aplica métodos de superación (PROMETHEE) y la de Escobar y Moreno (1993) quienes utilizan el Proceso Analítico Jerárquico.

4. TECNICAS MULTICRITERIO DISCRETAS EN LA PLANIFICACION DEL RIO TISZA

La primera aplicación de una técnica multicriterio al problema de la planificación del río Tisza la realizaron David y Duckstein (1976) utilizando el método Electre I, primero de los métodos de superación propuesto por Roy (1968). Por ser la primera de las aplicaciones al problema de planificación del río Tisza, se expone detalladamente la selección de los criterios considerados y la obtención de las escalas de medida de las alternativas con respecto a cada criterio. Distinguieron dos valores diferentes para los pesos de los criterios: valor uno asociado a los criterios ocupación de superficie, impacto en el empleo, posibilidades de desarrollo y sensibilidad a datos, y valor dos para los restantes. El resultado que obtuvieron señala a las alternativas I y II como preferidas a las demás. En este caso las alternativas I y II forman parte del núcleo de la relación de superación (dominantes). Los autores comentan que la alternativa II es una alternativa que ofrece un razonable compromiso entre los criterios, y proponen una mezcla de los proyectos I y II como solución final.

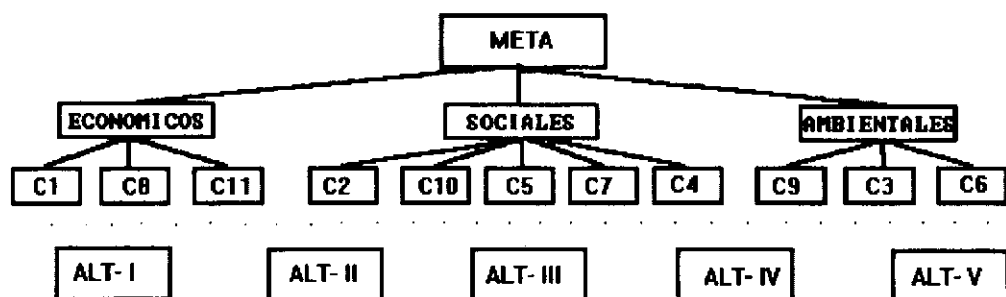
Keeney y Wood (1977) aplicando la Teoría de Utilidad Multiatributo, obtienen la siguiente ordenación: I - II - IV - V - III, donde las alternativas I y II dominan claramente a las demás. Utilizaron unos pesos distintos (otro decisor) de los empleados por David y Duckstein.

Szidarowsky et al. (1986) estudian el mismo caso minimizando la distancia al punto ideal utilizando la norma de Tchebycheff. Esta aplicación ofrece algunas dudas metodológicas como manifiesta Barba-Romero (1992). Este último autor aplica dos métodos a la resolución del problema: el de Ponderación Lineal y el método PROMETHEE. En ambos casos los pesos considerados son los iniciales de David y Duckstein y la ordenación de las alternativas coincide (I - II - IV - III - V).

La discrepancia entre las ordenaciones obtenidas por Keeney y Wood por un lado, y Barba-Romero por otro es explicada por este último autor como un error en los datos que utilizaron Keeney y Wood, de forma que si estos hubieran sido correctos la ordenación hubiera sido la misma por él obtenida.

Una última aplicación a este problema es la realizada utilizando el Proceso Analítico Jerárquico, por Escobar y Moreno (1993). En este caso los juicios considerados en el modelo corresponden a la opinión de los propios autores y algunos comentarios anteriores. La ordenación de las alternativas obtenida es la misma que alcanzó Barba-Romero en su estudio y Keeney y Wood salvando el error detectado por Barba-Romero.

Para adecuar el modelo AHP propuesto a la definición estricta realizada en el planteamiento inicial del problema, y a las aproximaciones utilizadas anteriormente en la resolución del problema, se ha seguido la siguiente jerarquía (Figura 1), donde las cinco alternativas cuelgan de cada uno de los nodos de los subcriterios. Los juicios emitidos para la obtención de las matrices de comparaciones pareadas utilizadas en el modelo están basadas en los comentarios realizados en las anteriores aplicaciones multicriterio de este problema (vease anexo).



Hay aspectos o subcriterios del problema que pueden encuadrarse indistintamente en los diferentes criterios (económicos, sociales y ambientales). En nuestro primer estudio se incorporaron según una interpretación actual del problema. En esta ocasión se ha seguido la estructura propuesta en el planteamiento inicial del problema realizada a mediados de los años 70. De esta forma se ha analizado la robustez del modelo ante modificaciones en la agrupación de subcriterios.

Por otro lado, señalar que esta jerarquía, a diferencia de la propuesta inicial, no recoge explícitamente el criterio 12 (sensibilidad a los datos) sino a través del estudio postoptimal del modelo propuesto.

Los resultados obtenidos, utilizando el programa EXPERT CHOICE v.8.0 (Expert Choice, Inc.), en esta segunda aplicación de AHP no difieren de los alcanzados en la inicial, y se aproximan bastante a las obtenidas con las restantes técnicas multicriterio aplicadas (ver Tabla 2).

Orden	ELECTRE	MAUT	P.LIN.	PROMETHEE	AHP(1)	AHP(2)
1	I - II	I(.832)	I(7.0)	I(.650)	I(.302)	I(.383)
2		II(.831)	II(6.1)	II(.488)	II(.299)	II(.259)
3		IV(.648)	IV(3.6)	IV(-.038)	IV(.185)	IV(.180)
4		V(.521)	III(2.2)	III(-.513)	III(.109)	III(.090)
5		III(.503)	V(2.1)	V(-.587)	V(.105)	V(.089)

Tabla 2 - Resultados de los diferentes enfoques Multicriterio

A la hora de seleccionar la mejor alternativa utilizando AHP(2) (véanse la Tabla 2, y la Figura 2 del Anexo), hay dos de ellas, la I y la II que dominan ampliamente a las demás. De las tres restantes, la alternativa IV es preferida a las otras dos (alternativas III y V) que están muy próximas entre sí.

Las prioridades globales obtenidas indican que la alternativa I es preferida a la II, y por lo tanto la mejor.

Para concluir este apartado e intentar un mejor conocimiento del proceso de decisión se estudia la posibilidad de cambio de rango entre las dos primeras alternativas al modificar la importancia relativa de los criterios y subcriterios.

En primer lugar se analiza la posibilidad de cambio de rango al variar la importancia relativa de los criterios. Considerando de forma individual los criterios de tipo social y los de tipo ambiental se observa que la alternativa I supera claramente a la II. No ocurre lo mismo para los criterios de tipo económico, donde la alternativa II es mejor que la I. Al aumentar la importancia relativa de este criterio** se consigue que globalmente la alternativa II supere a la I, y por lo tanto haya cambio de rango. Este cambio no se produce para valores cercanos a la ponderación de partida que recibe el criterio económico (0.213). La alternativa I es la preferida si la prioridad del criterio económico se encuentra en el intervalo [0, 0.573].

En cuanto a la posibilidad de cambio de rango entre las alternativas I y II al variar la importancia relativa de los subcriterios permaneciendo constante la importancia relativa dada a los criterios, señalar que el estudio se centra exclusivamente en aquellas modificaciones que pueden dar lugar a cambio de rango, esto es, en las que la alternativa II pueda llegar a superar a la I. En los criterios de tipo económico, el aumento del subcriterio costes (único para el que individualmente la alternativa II supera a la I) no produce modificación en la ordenación de partida. Por tanto, no hay posibilidad de cambio de rango al modificar la importancia relativa de ninguno de los subcriterios de tipo económico (costes, impacto en el empleo y posibilidad de desarrollo).

Dentro de los subcriterios de tipo social, el único para el que individualmente la alternativa II supera a la I es el C7 - superficie ocupada-. Tomando valores superiores a 0.896 conseguimos que la alternativa II supere globalmente a la alternativa I, mientras que si la importancia relativa de dicho subcriterio cae en el intervalo [0, 0.896] (el valor inicial es de 0.056), la alternativa I seguiría siendo la preferida.

De los subcriterios de tipo ambiental el subcriterio C6 -protección de riadas- es el único para el que la alternativa II supera a la I. Variando la importancia relativa de este subcriterio no se produce cambio de rango entre las dos alternativas con respecto a la meta global.

Como es lógico, modificando simultáneamente los tres subcriterios para los que la alternativa II supera a la I (costes, superficie ocupada y protección de riadas) se podría alcanzar el cambio de rango con valores inferiores a los necesarios para alcanzarlo de forma individualizada. No obstante, estas cantidades siguen distando notablemente de los valores de partida, que son 0.625 (0.133), 0.056 (0.026) y 0.255 (0.083) respectivamente. Por ejemplo, si estos valores pasan a ser 0.925 (0.197), 0.356 (0.164) y 0.655 (0.213) se produciría cambio de rango. (Los valores entre paréntesis son las prioridades globales y los valores sin paréntesis las prioridades locales).

De todo este estudio se observa que es necesario variar bastante la importancia relativa de criterios y subcriterios para que se produzca un cambio de rango. Este mismo hecho ya fue señalado por Barba-Romero al aplicar PROMETHEE.

La última variante considerada para el nuevo modelo es la incorporación de la incertidumbre en el mismo. Para ello, se permite que los juicios emitidos por el decisor al comparar los elementos del primer nivel de la jerarquía tomen valores en un intervalo (Moreno y Vargas, 1991). Realizado un estudio de simulación para un margen de tolerancia en los juicios del 30% respecto a los valores de partida y

suponiendo que éstos siguen una distribución uniforme recíproca (véase Moreno y Vargas, 1993) se observa, con 10⁶ simulaciones, que sólo se presentan dos estructuras de preferencia: (1) I-II-III-IV-V y (2) I-II-IV-III-V con probabilidades respectivas de 0.556 y 0.444. En el intervalo de tolerancia considerado la probabilidad de cambio de rango entre las dos primeras alternativas es nula. Sin embargo, y a pesar de las prioridades obtenidas en el caso determinístico para las alternativas III (.090) y IV (.180), existe cambio de rango entre dichas alternativas en el 55% de los casos. No obstante, tanto la prioridad de III como la de IV distan notablemente de la de I.

En general, la incorporación de la incertidumbre ocasionada por cualquiera de las cuatro causas inicialmente propuestas por David y Duckstein (predicción, políticas desconocidas, económica y tecnológica) se realiza, en los modelos basados en AHP, mediante intervalos de juicio de diferentes amplitudes. En el caso concreto de la segunda aplicación de AHP, los efectos de la incertidumbre se han estudiado en el análisis de sensibilidad. Ahora bien, como las alternativas I y II son muy poco sensibles a los datos y han quedado claramente destacadas en el proceso de selección, no ha sido preciso un estudio más detallado del mismo.

De los restantes estudios postóptimos realizados en las otras aplicaciones de TMCD destacar que Keeney y Wood analizan la posibilidad de cambio de rango entre las dos primeras alternativas (II pasa a ser preferida a I), cuando se modifican los pesos del criterio C1 -costes- y del criterio C2 -probabilidad de escasez-. Esta situación se produce aumentando el primero y disminuyendo el segundo. Así mismo, estudian qué sucede cuando se modifican las valoraciones en costes de los proyectos, determinando cuál debería ser el coste del proyecto I para que las dos mejores alternativas se igualaran (tuvieran el mismo valor de la función de utilidad), y sugieren un estudio detallado de la alternativa IV en las mejores condiciones.

Del análisis de sensibilidad realizado por Barba-Romero para el método PROMETHEE se deduce que la ordenación final de las alternativas no se vería afectada aunque los pesos variasen bastante.

Escobar y Moreno en su primera aplicación de AHP al problema, observan la posibilidad de cambio de rango entre las dos mejores alternativas (I y II). Aumentando la importancia relativa del criterio Económico por encima de 0.66 (el valor inicial es 0.637) la alternativa II era preferida a la I. En cuanto a la influencia de los subcriterios en la ordenación de estas dos primeras alternativas se señala que aumentando la importancia relativa del subcriterio *riadas* con un valor por encima de 0.38 (el valor inicial es 0.320), el rango de las dos primeras alternativas respecto a la meta global cambiaría (II preferida a la I).

5. CONCLUSIONES

Este trabajo compara los resultados obtenidos en la resolución del problema de la planificación del río Tisza, al aplicar distintas técnicas de decisión multicriterio con los obtenidos utilizando el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), una de las técnicas multicriterio más flexibles, abiertas y realistas, al mismo problema.

Estos resultados coinciden con los alcanzados en el estudio de David y Duckstein (1976) en el que las alternativas I y II son claramente preferidas al resto. También se alcanza la misma ordenación de las cinco alternativas (ver Tabla 2) que las obtenidas por Keeney y Wood (1977) (salvando el error detectado por Barba-Romero); por Barba-Romero (1992) y por Escobar y Moreno (1993) en una primera aproximación del problema utilizando AHP.

Destacar la importancia que tiene la construcción de la jerarquía al aplicar AHP, pues nos permite un mejor conocimiento del problema, y con ello la utilización de valores más realistas para los juicios.

Así mismo, esta técnica permite determinar la probabilidad de cambio de rango entre las alternativas cuando se incorpora la incertidumbre en el modelo mediante intervalos de juicio. En nuestro caso, suponiendo una tolerancia de los juicios en torno al 30% de su valor inicial, no se produce cambio de rango a la hora de seleccionar la mejor alternativa, pero sí se produce en la ordenación total de las cinco alternativas, aunque este hecho no afecte al objetivo inicialmente considerado.

NOTA

(*) Una versión inicial de este trabajo fue presentado en la VII Reunión de Asepelt España. Cádiz, Junio 1993.

(**) Este aumento ocasiona una disminución en los otros dos criterios, manteniéndose constante la razón entre ambos.

BIBLIOGRAFIA

BARBA-ROMERO S. (1992): "La Decisión Multicriterio en el Análisis y la Gestión de los Recursos Naturales", W.P. del curso "El Análisis Económico en la Gestión de Recursos Naturales". UIMP, Santander.

COHON J.L. (1978): *Multiobjective Programming and Planning*. Academic Press.

DAVID L.; DUCKSTEIN L. (1976): "Multicriterion ranking of alternative long-range water resources systems", *Water Resources Bulletin*, 12, 4, 731-754.

ESCOBAR M.T.; MORENO-JIMENEZ J.M. (1993): "Utilización del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) en la Planificación del Río Tisza", *Actas de la VII Reunión Asepelt España*, Cádiz. Vol. II, pp. .

GOMEZ OREA D. (1992): *Evaluación de Impacto Ambiental*. Editorial Agrícola Española, Madrid.

HEER J.E.; HAGERTY J. (1977): "Environmental Assesment and Statements", Van Nostrand, New York.

HUNSAKER C.T.; CARPENTER D.E. (1990): *Environmental Monitoring and Assesment Program. Ecological Indicators*. EPA, Washington.

KEENEY R.L.; RAIFFA H. (1976): *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*. Ed. Wiley, New York.

KEENEY R.L.; WOOD E.F. (1977): "An Illustrative Example of the Use of Multiattribute Utility Theory for Water Resources Planning", *Water Resources Research*, 13, 4, 705-712.

MOPU (1980): *Medio Ambiente. Acción Institucional* 93.

MORENO-JIMENEZ J.M^a; VARGAS L.G. (1991): "Intervalos de Juicio en el Proceso Analítico Jerárquico", *Actas de la V Reunión ASEPELT España*. Las Palmas.

MORENO-JIMENEZ J.M^a; VARGAS L.G. (1993): "A Probabilistic Study of Preference Structures in the Analytic Hierarchy Process with Interval Judgment", *Mathematical and Computer Modelling*, 17, 4-5.

ROY B. (1968): "Classement et choix en presence de points de vue multiple (la methode ELECTRE)", R.I.R.O., 2, 8, 57-75.

ROY B. (1985): Methodologie Multicritere d'aide a la decision. Gestión Económica.

SAATY T.L. (1977): "A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures", Journal of Mathematical Psychology, 15 234-281.

SAATY T.L. (1980): The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York.

SAATY T.L.; GHOLAMNEZHAD A.H. (1982): "High-level nuclear waste management: Analysis of options", Environment and Planning B, 9(2), 181-196.

SZIDAROVSKY F.; GERSHON M.E.; DUCKSTEIN L. (1986): Techniques for multiobjective decision making in systems management. Elsevier.

ANEXO

	E	S	A	w(M)		E	S	A
Económicos	1	1/2.2	1/1.5	.213		1	[1/2.9,2/3]	[0.5,1]
Sociales		1	1.4	.462			1	[1,1.8]
Ambientales			1	.325				1

Matriz de comparaciones pareadas de criterios respecto a la meta y matriz de Intervalos de Juicio.

	Co	I.E	P.D	w(E)
C1 - Costes	1	3	4	.625
C8 - I.Empleo		1	2	.238
C11 - P.Desarrollo			1	.136

Matriz de comparaciones pareadas de los subcriterios económicos.

	Es	C.I	R	S	E	w(S)
C2 - Escasez	1	4	5	7	7	.554
C10 - Coop. Intnal.		1	1	4	4	.181
C5 - Recreo			1	3	3	.153
C7 - Superficie				1	1	.056
C4 - Energía					1	.056

Matriz de comparaciones pareadas de subcriterios sociales.

	I.A	Ca	Ri	w(A)
C9 - Impacto Amb.	1	1/3	2	.281
C3 - Calidad agua		1	1	.464
C6 - Riadas			1	.255

Matriz de comparaciones pareadas de subcriterios ambientales.

	A1	A2	A3	A4	A5	w(C1)	A1	A2	A3	A4	A5	w(C8)	A1	A2	A3	A4	A5	w(C11)
A1	1	1/3	1	1/2	1	.124	1	1	3	5	5	.359	1	3	4	6	4	.480
A2			3	2	3	.395		1	3	5	5	.359		1	2	5	2	.222
A3			1	1/2	1	.124			1	3	3	.153			1	3	1	.124
A4				1	2	.234				1	1	.064				1	1/3	.051
A5					1	.124					1	.064					1	.124

Matrices de comparaciones pareadas de las alternativas con respecto a los subcriterios económicos.

	A1	A2	A3	A4	A5	w(C2)	A1	A2	A3	A4	A5	w(C10)	A1	A2	A3	A4	A5	w(C5)	A1	A2	A3	A4	A5	w(C7)	A1	A2	A3	A4	A5	w(C4)
A1	1	4	6	6	6	.545	1	2	3	5	3	.414	1	3	5	7	7	.509	1	1/2	1/2	1/4	1/3	.079	1	2	7	5	7	.466
A2		1	4	4	4	.241		1	2	3	2	.241		1	3	5	5	.255		1	1	1/3	1/2	.137		1	6	4	6	.317
A3			1	1	1	.071			1	2	1	.135			1	4	4	.138			1	1/3	1/2	.137			1	1/3	1	.051
A4				1	1	.071				1	1/2	.074				1	1	.049				1	2	.403				1	3	.116
A5					1	.071					1	.135					1	.049					1	.244					1	.051

Matrices de comparaciones pareadas de las alternativas con respecto a los subcriterios sociales.

	A1	A2	A3	A4	A5	w(C9)	A1	A2	A3	A4	A5	w(C3)	A1	A2	A3	A4	A5	w(C6)
A1	1	3	7	3	4	.468	1	3	7	1	5	.365	1	1/3	2	1/3	5	.144
A2		1	4	1	2	.187		1	5	1/3	2	.148		1	5	1	8	.367
A3			1	1/4	1/3	.048			1	1/7	1/3	.039			1	1/5	4	.087
A4				1	2	.187				1	5	.365				1	8	.367
A5					1	.111					1	.083					1	.035

Matrices de comparaciones pareadas de las alternativas con respecto a los subcriterios ambientales.

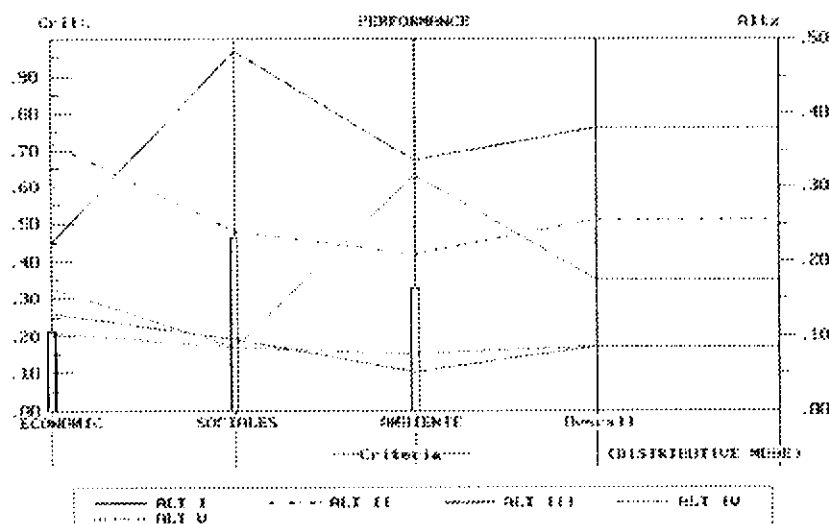


Figura 2. Caminos de valor de los criterios

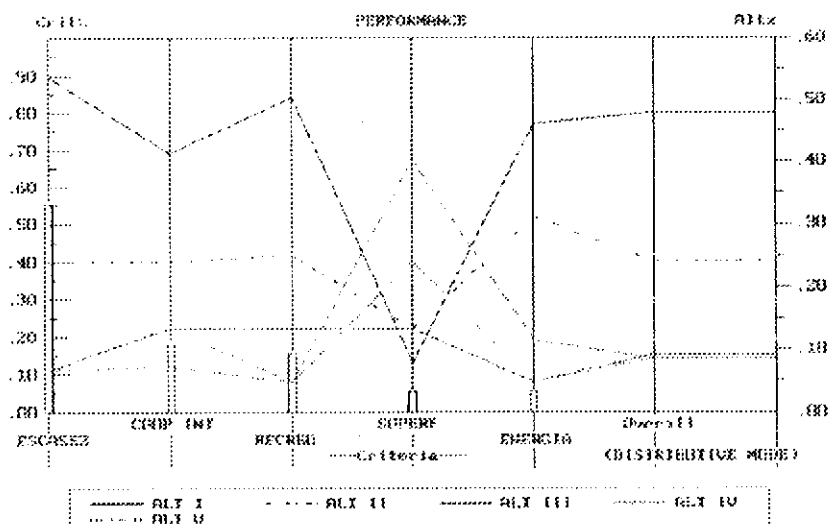


Figura 3. Caminos de valor de los subcriterios sociales