

SISTEMA SOPORTE PARA LA ASIGNACION DE AGUA PARA RIEGO Y OTROS USOS

Patricia Jaramillo A. y Ricardo A. Smith Q.
Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas,
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín
pjaramilloa@guayacan.udem.edu.co

RESUMEN

Se presenta un sistema soporte a la decisión para el problema específico de asignación de agua para riego y otros usos en una cuenca, cuando se pretende alcanzar múltiples objetivos en conflicto. El sistema facilita hacer decisiones respecto al regadío, considerando la eficiencia, la aplicación técnicamente óptima de riego y adopción de cultivos, bajo el concepto de sostenibilidad, eficiencia social y económica. Permite además incorporar otros usos del recurso hídrico como por ejemplo el uso doméstico.

PALABRAS CLAVES: Optimización, Decisión, Planificación, Recursos hídricos, Riego

ABSTRACT

A decision support system for watersheds water assignment for irrigation and other uses is presented. The system can consider several conflicting objectives. It facilitates irrigation systems decision making under considerations of efficiency, optimum water application, and culture selection, under the concepts of sustainability and social efficiency, and economic considerations. It allows to consider other water uses as domestic consumption.

KEY WORDS: Optimization, Decision, Planning, Water resources, Irrigation

1. INTRODUCCIÓN

Cuando se presenta un periodo de sequía hidrológica es posible que, mediante una buena gestión del agua, se tengan recursos almacenados en periodos hidrológicamente abundantes que ayuden a paliar el déficit impuesto por la naturaleza en las épocas deficitarias. La gestión en el inicio de la sequía es importantísima porque de ella depende que los efectos de la sequía sean mínimos y que el uso de las reservas pueda extenderse temporalmente. La agricultura es el sector económico más vulnerable a la sequía. En este periodo se hace necesario regar deficitariamente los cultivos existentes, o reemplazarlos por cultivos que permitan dotaciones menores, o simplemente eliminar cultivos de riego en zonas tradicionalmente agrícolas. El fuerte impacto a nivel económico, social y ecológico que

tales opciones suelen presentar, hace que las decisiones deban afrontarse de manera inteligente, y los planificadores deben ofrecer soluciones que disminuyan el impacto de la manera más eficiente posible. Se requiere una respuesta a las preguntas: ¿Cómo asignar el agua a los diferentes usos? ¿Con cuáles cultivos de riego y bajo que condiciones puede satisfacerse simultáneamente objetivos deseados?.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El escenario presentado al inicio de una campaña agrícola en una cuenca es el de una serie de embalses, con cierta cantidad de reservas hídricas destinadas para uso agrícola u otros usos en un conjunto de zonas de demanda. Se tendrá que decidir sobre qué cultivar de entre una serie de productos agrícolas, en los que predominarán

seguramente los tradicionales. Se tendrá, además presente, un conjunto de objetivos que si bien, se sabrá con anterioridad la imposibilidad de obtener simultáneamente el valor “óptimo para cada uno de ellos”, se desea que con la alternativa seleccionada se obtengan niveles satisfactorios de esos objetivos, usando todos los recursos disponibles de la forma más eficientemente posible. Matemáticamente el problema puede representarse de la siguiente manera:

Durante el año se dispone de una cantidad de agua E igual a:

$$E = \sum_{i=1}^{nem} E_i \quad (1)$$

donde E_i es la cantidad de agua disponible en el embalse i y nem es el número de embalses.

En cada una de las nde zonas de demanda de agua se requiere agua para algunos usos como riego de algunos cultivos, o para uso doméstico. Denominamos ncu al número de usos posibles (todos los cultivos posibles más uso doméstico), de forma tal que para cada zona de demanda j se tienen los siguientes datos:

s_{jk} , suelo máximo disponible (en ha) para el cultivo k .

m_{jk} , superficie mínima (en ha) sembrada con el cultivo k . Se supone que es un límite inferior impuesto por el tomador de decisiones.

d_{jk} , dotación (en m³/ha) necesaria para el cultivo k . Al depender de estructuras presentes, tecnología de riego, hábitos de los regantes, es posible que iguales tipos de cultivos tengan dotaciones diferentes según las zonas de demanda.

Las anteriores variables tomarán el valor cero cuando el uso k es para uso doméstico.

h_j , superficie total (en ha) de la zona de demanda. Este valor limita la suma de las superficies dedicadas a diferentes cultivos dentro de una misma zona.

p_{jk} , dotación (en m³/vivienda) necesaria cuando el uso k es para uso doméstico.

Lógicamente, no todas las zonas de demanda podrán disponer del agua almacenada en todos los embalses debido a razones físicas o políticas. Denominamos “coeficiente de conectividad del embalse i con la demanda j ” a un valor c_{ij} que tomará como valor uno o cero, dependiendo de si es posible o no, suministrar agua del

embalse i a la demanda j , respectivamente.

Las variables de decisión serán la cantidad de agua suministrada desde cada embalse, a cada demanda, para cada uso posible, que ofrezcan niveles de los objetivos eficientes y satisfactorios para el que toma las decisiones. Definimos esas variables de decisión como x_{ijk} , representando las cantidades de agua asignadas desde el embalse i al uso k de la demanda j .

El conjunto de datos anterior, permite definir las restricciones generales del problema. Ellas son:

- La suma de las cantidades de agua suministrada por el embalse i , no puede exceder la cantidad de agua almacenada y disponible para riego de ese embalse:

$$\sum_{j=1}^{nde} \sum_{k=1}^{ncu} c_{ij} \cdot x_{ijk} \leq E_i \quad i=1 \dots nem \quad (2)$$

- El área sembrada con el cultivo k en la zona de demanda j , debe ser mayor o igual que el límite mínimo y menor o igual que el límite máximo impuestos por el decisor para esa zona y para ese cultivo:

$$\sum_{i=1}^{nem} \left(\frac{x_{ijk}}{d_{jk}} \right) \geq m_{jk} \quad \forall j=1, \dots, nde, \quad \forall k=1, \dots, ncu \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{nem} \left(\frac{x_{ijk}}{d_{jk}} \right) \leq s_{jk} \quad \forall j=1, \dots, nde, \quad \forall k=1, \dots, ncu, \quad s_{jk} \neq 0 \quad (4)$$

- Para cada demanda j , la superficie total cultivada no puede exceder el área disponible para cultivos de riego:

$$\sum_{k=1}^{ncu} \sum_{i=1}^{nem} \left(\frac{x_{ijk}}{d_{jk}} \right) \leq h_j \quad \forall j=1, \dots, nde \quad (5)$$

En las anteriores restricciones, si el uso k es para uso doméstico, no se incorpora a la restricción.

- La población atendida en la demanda j , debe ser menor o igual al número total de viviendas V_{jk} . En esta restricción, solo se incorpora el uso k para uso doméstico.

$$\sum_{i=1}^{nem} \left(\frac{x_{ijk}}{p_{jk}} \right) \leq V_{jk} \quad \forall j=1, \dots, nde, \quad k=\text{uso doméstico} \quad (6)$$

El decisor o decisores tienen interés en conseguir algunos objetivos, que están en conflicto y no son comparables $Z_1(x_{ijk})$, $Z_2(x_{ijk})$, ..., $Z_q(x_{ijk})$. Si las funciones objetivo son lineales, cada objetivo será de la forma:

- Maximizar

$$Z_l = \sum_{i=1}^{nem} \sum_{j=1}^{nde} \sum_{k=1}^{ncu} a_{ijk} \cdot x_{ijk} \quad (7)$$

En la que a_{ijk} es el número de unidades del objetivo l , obtenidas por la asignación de una unidad de agua a la demanda j para el uso k . Por ejemplo, si el objetivo es maximizar el número de jornales, los coeficientes a_{ijk} corresponden al número de jornales requerido para cultivar una superficie con cultivo k en la zona de demanda j , que requiere de un metro cúbico de agua de riego. Si obj es la unidad de medida de Z_l , los coeficientes a_{ijk} tendrán por unidades obj/m^3 .

Debido a que no todas las demandas tienen conexión con todos los embalses, y no en todas las demandas es posible cultivar los productos agrícolas especificados, o se requiere de agua para uso doméstico, se tendrán muchas matrices con muchos ceros. Para disminuir costo computacional algunas matrices de la formulación inicial del problema se convirtieron en matrices de menor dimensión en las que todos los términos son diferentes de cero. Por ejemplo, el vector de variables de decisión, cuyos términos son x_{ijk} , se convierte en una matriz de tres columnas (embalse i , demanda j , uso k) y el número de filas corresponde al número de combinaciones factibles i, j, k , dependiendo de las conexiones posibles embalse-demanda y los usos posibles en cada demanda.

Es casi seguro que los valores para las variables x_{ijk} que maximizan un objetivo, no coincidirán con los que maximizan los otros objetivos. Este es un problema de toma

de decisión en el que las técnicas multiobjetivo pueden ser usadas eficientemente. El análisis multiobjetivo permite asignar el agua considerando cuales serían los resultados de las acciones a tomar, en función de ciertos objetivos físicos, económicos y sociales que se persiguen. Las metodologías multiobjetivo tienen una componente matemática (con base en optimización y eficiencia matemática) y una componente subjetiva, que incorpora las preferencias del decisor. En especial, esta última componente hace que en el proceso de decisión se requiera de herramientas facilitadoras del buen entendimiento del problema, y de la articulación de las preferencias del decisor. Los sistemas soporte a la decisión constituyen herramientas verdaderamente útiles para dicho fin.

3. SISTEMA SOPORTE

Para el presente problema particular se desarrolló un sistema soporte amigable que ofrece una gama de técnicas de análisis multiobjetivo, facilitando su utilización, permitiendo al decisor analizar posibles escenarios de riego, y suministrando información suficiente sobre las posibles consecuencias de las acciones. El decisor quisiera saber, por ejemplo, como serían sus ganancias económicas si cultiva sólo en zonas con déficit de empleo, cómo son las interrelaciones entre los demás objetivos, si hay o no soluciones robustas, etc.

En el sistema soporte (Jaramillo, 1999), el decisor debe introducir al programa todos los datos del problema: capacidad de los embalses, áreas de las zonas de demanda, conexiones posibles, dotación por vivienda etc. Todos los datos se registrarán en una base de datos, para su mejor gestión y para un posterior uso, si se requiere. En las figuras 1, 2 y 3 se presenta cuadros de diálogo de interacción con el usuario para la entrada de datos.

FIGURA 1. Entrada de datos generales

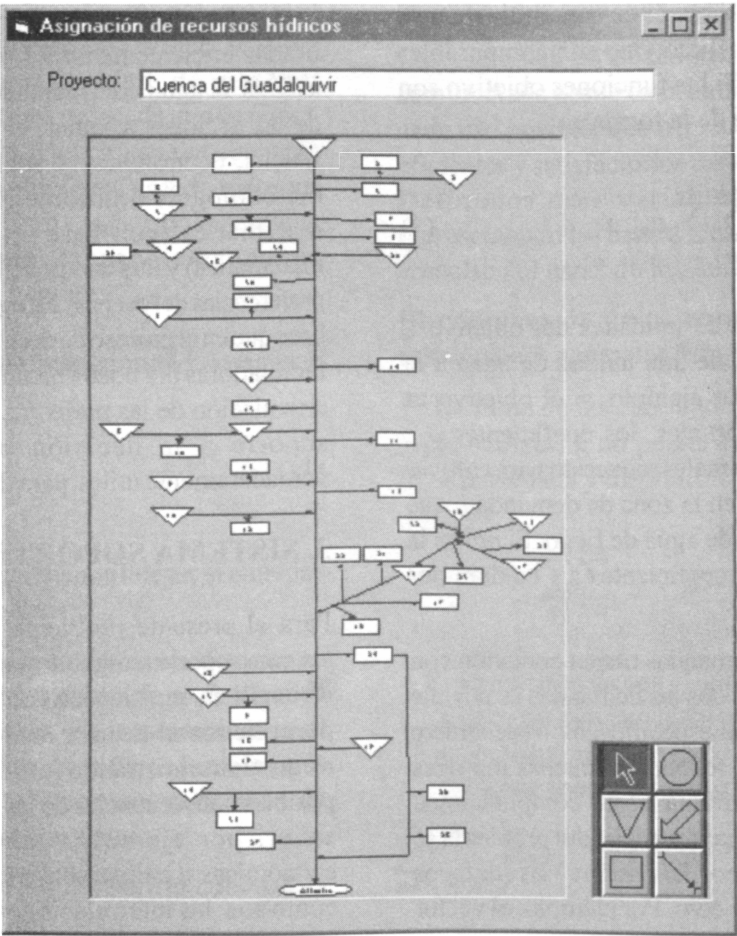


FIGURA 2. Esquema simplificado de la cuenca

tipos de cultivos

Número de cultivos: 8

Introduzca los tipos de cultivos y las dotaciones típicas (opcional)

	CULTIVO	DOTACION TIPICA (m3/ha)
1	frutales	3500
2	citricos	3500
3	tomate	5000
4	olivo	3500
5	trigo	4000
6	algodon	5000
7	alfalfa	4000
8	arroz	10000

Adicionar cultivo Eliminar cultivo Aceptar Cancelar

FIGURA 3. Entrada de datos de los posibles cultivos

En la práctica de la toma de decisión con múltiples objetivos, se recomienda el uso de varias metodologías. Cuando la solución obtenida por los diferentes métodos es la misma, da una gran confianza sobre los resultados, y cuando no lo es puede indicar problemas sobre la formulación del problema o sobre la representación de la estructura de preferencias del decisor. El sistema soporte desarrollado ofrece al decisor una serie de metodologías: optimización monocriterio, factores ponderantes, método de las restricciones, programación por compromiso con diferentes métricas, programación por metas, ELECTRE I, II y IV, función de utilidad multicriterio, promedios ponderados y métodos novedosos como el “ECUALIZADOR” para un solo decisor y el “ECUALIZADOR MULTIDECISOR”. En Smith et al. (2000), se presentan amplias descripciones de estos métodos.

Cada metodología requiere de una serie de datos que la interfaz va solicitando mediante cuadros de diálogo. Cuando el sistema solicita información del decisor acerca de sus preferencias, solicita sólo parámetros poco

redundantes y de mayor significado directo y claro (siempre ofrece valores por defecto para el decisor no experto en técnicas de decisión).

El decisor puede ver los resultados en la forma que lo desee, es decir, para una solución eficiente puede ver tablas y gráficas, seleccionar los objetivos cuyos valores desea comparar, ver los resultados correspondientes a un solo embalse o una combinación embalse-demanda, o el área total que se cultiva con cierto producto agrícola, etc. Por ejemplo, para un embalse puede presentar una gráfica que informa las demandas a las que le suministra agua y para qué cultivos, cuanta agua no será utilizada, etc.

El programa permite visualizar simultáneamente resultados de diferentes metodologías, según lo requiera el decisor. Cada metodología permite además hacer análisis de sensibilidad. En la figura 4 se presenta el cuadro de dialogo mediante el cual el decisor solicita información acerca de la solución encontrada en algún punto del proceso, y en las figuras 5 y 6, se presentan posibilidades gráficas de resultados.

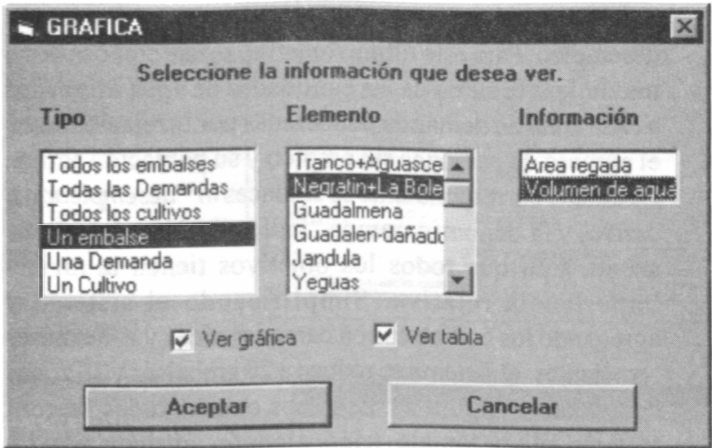


FIGURA 4. Cuadro para la solicitud de presentación de resultados

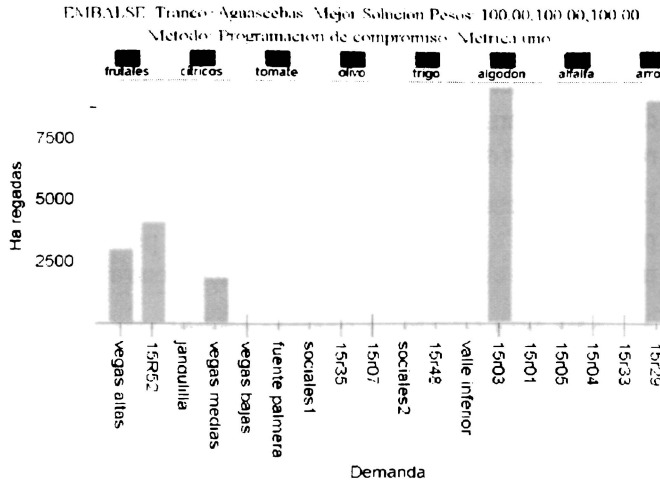


FIGURA 5. Opción gráfica de los resultados

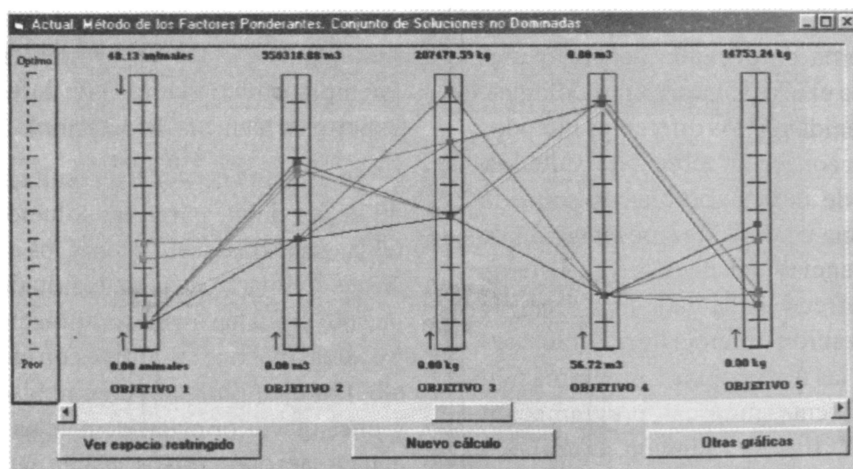


FIGURA 6. Gráfica interactiva del método de factores ponderantes

Los métodos novedosos presentes en el sistema soporte son los denominados ecualizadores. El ECUALIZADOR, valiéndose de herramientas gráficas, permite que el decisor, a la luz de información que se le va presentando progresivamente, vaya “atrapando” la alternativa correspondiente a sus verdaderas preferencias, requiriendo de pocos parámetros de interpretación directa y poca manifestación numérica de la subjetividad. No sólo permite la obtención de una sola alternativa eficiente, sino que, si así lo prefiere el decisor, permite obtener un conjunto de soluciones eficientes (o no dominadas) en número y localización en el espacio de decisión conveniente.

Con el ECUALIZADOR MULTIDECISOR, en un proceso interactivo, los decisores en conjunto van “atrapando” la alternativa eficiente que en forma homogénea satisface a todos ellos. Cada decisor trabaja en forma anónima buscando sus intereses personales. El ecualizador equilibra esos intereses forzando a que cada decisor se disponga a perder en ciertos beneficios interesantes para otros decisores, a cambio de otras concesiones. Adicional al método se incorporaron herramientas para la penalización de intereses radicales, y herramientas que reflejan la jerarquía entre los decisores, permitiendo incorporar pesos de importancia relativa de los decisores, asignados mediante votación.

El sistema desarrollado podría ser útil para otros tipos de problema de toma de decisiones como “el problema del transporte” o el “problema de producción”, entre otros.

4. APLICACIÓN: ASIGNACIÓN DE AGUA PARA RIEGO EN LA CUENCA DEL RÍO GUADALQUIVIR

El uso de la cuenca del Río Guadalquivir (España) ha sido históricamente agrícola pero se presenta con

frecuencia escasez de recursos hídricos. En los últimos años, las fuertes sequías han impulsado a que muchos de los cultivos que se cultivaban casi permanentemente se estén reemplazando por otros que exigen menor dotación de agua. Para la aplicación del sistema propuesto, los objetivos considerados fueron: maximizar los beneficios económicos, maximizar el número de empleos generados y priorizar las zonas con mayores problemas de desempleo. Para este último objetivo se usa como criterio maximizar la suma de las cantidades de agua asignadas a cada zona de demanda ponderadas por la relación entre el número de personas sin empleo y su población activa. La unidad correspondiente es entonces $m^3 \cdot \text{desempleados} / \text{activa}$, y la denominaremos “índice de desempleo”. Se asume aquí que todos los objetivos tienen la misma importancia relativa. Simplificando el sistema y agregando los embalses con características y conexiones semejantes, el sistema se reduce a 20 embalses y 36 zonas de demanda (figura 2). Los usos considerados fueron: frutales, olivo, tomate, trigo, algodón, cítricos, arroz y alfalfa. No se consideró aquí uso doméstico.

Si no se reformula el problema como se indicó anteriormente, el tamaño del problema sería excesivo, pues se tendrían 5760 variables de decisión. Con la reformulación del problema, para cada año de planificación se requiere de la asignación de valores a 508 variables y cumplir con 151 restricciones.

Se ha considerado una situación igual a la del año 1991. Para el método de programación por metas, se simuló que la meta del decisor es obtener beneficios de 273.180 millones de pesetas, disponer de 23.968.500 jornales y obtener 164.790.896 en el índice de desempleo. Por brevedad, se evalúan aquí los resultados únicamente en el espacio de los objetivos.

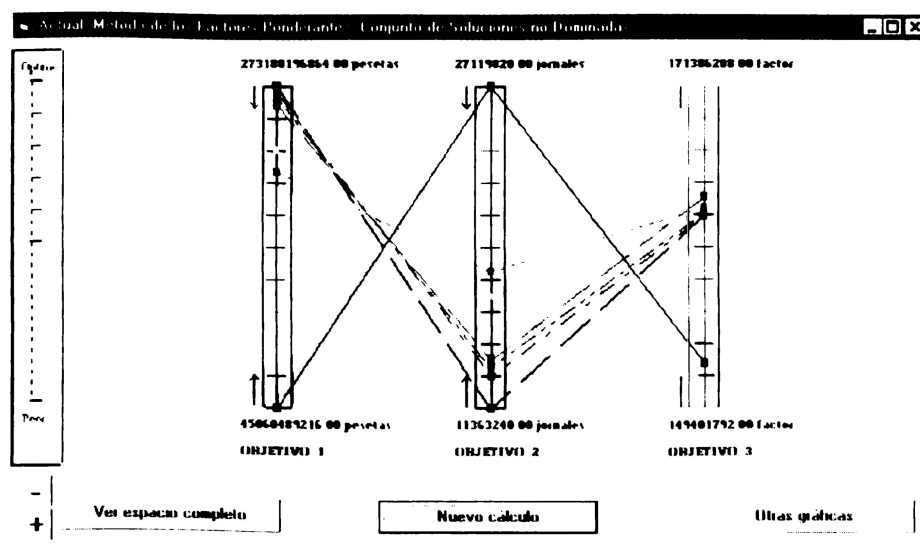
En la tabla 1 se presentan resultados encontrados por los métodos programación de compromiso, y programación por metas. En la figura 7 se presentan

gráficamente resultados obtenidos por los métodos de los factores ponderantes y el de las restricciones.

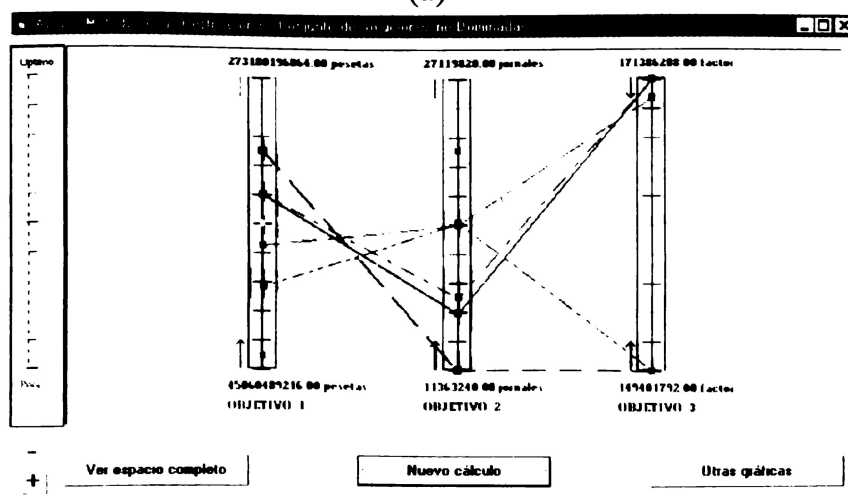
TABLA 1. Resultados del análisis multiobjetivo por los métodos programación de compromiso y programación por metas para el año simulado.

Objetivos	Ideal	Peor valor posible	Programación de compromiso, métrica = 1	Programación por metas
Beneficios (pesetas)	273 180 196	45 060 489 216	196 950 910 633	215 502 716 928
Empleo (jornales)	27 119 820	11 363 240	15 891 553	17 206 118
Índice de desempleo	171 386 208	149 401 792	171 035 034	164 790 896

Logros respecto a (ideal – peor)				
Beneficios (%)	100	0	66.6	74.7
Empleo (%)	100	0	28.7	37.1
Índice de desempleo(%) (%)	100	0	98.4	70.0



(a)



(b)

FIGURA 7. Alternativas no dominadas obtenidas por los métodos (a) factores ponderantes y (b) restricciones.

Las soluciones encontradas por los métodos que aportan una única alternativa no le dan al decisor la oportunidad de compararla con otras alternativas, ni de saber cuanto se tuvo que perder en unos objetivos para poder ganar en otros, o que nueva opción tendría si decide hacer ciertos intercambios. Puede realizarse con el ECUALIZADOR un proceso que se explica a continuación. El decisor inicia el proceso (figura 8a) con la alternativa correspondiente a la solución de compromiso con métrica 1 (puede usarse cualquier otro método) que obtendría un logro del 66.6%, 28.7% y 98.4% respecto al valor (ideal - peor) para el primer, segundo y tercer objetivo respectivamente. Esta solución obtiene 196 950 millones de pesetas, 15 891 553 jornales y 171 035 034 en el índice de desempleo. El decisor considera que para el segundo objetivo se obtiene un valor muy bajo respecto al máximo que es posible obtener y está dispuesto a disminuir en el tercer objetivo hasta un 50% de logro, correspondiente a 160 393 984 en el índice de desempleo, para obtener una solución que le proporcione un mejor valor en el segundo objetivo. Puede observarse que, entre las alternativas ofrecidas por el método de las restricciones y el de los factores ponderantes, no se obtuvieron soluciones con logros cercanos a este valor para el tercer objetivo. Ahora el equalizador le ofrecerá una nueva alternativa (figura 8b) que conserva el logro para el primer objetivo, aumenta el del segundo a 48% y disminuye el del tercero a 51%. Lo que se traduce en obtener 196 950 millones

de pesetas de beneficios, requerir de 18 941 448 jornales (aumentando en 3 049 895 jornales respecto a la primera alternativa ofrecida) y 160 716 432 en el índice de desempleo para el tercer objetivo (disminuyendo en 10 318 602 respecto a la primera alternativa ofrecida). Se supone ahora que al decisor le parece interesante la alternativa, pero al examinar los valores de las variables (figura 8c), observa que el embalse agregado “Tranco + Aguascebas” no le aporta nada a la demanda “Vegas Altas”, y entonces exige que una nueva solución le aporte al menos 4 000 000 m³ de agua para regar olivos y 2 000 000 m³ para regar trigo. El ECUALIZADOR le ofrecerá ahora una alternativa (figura 8d) que respeta estas nuevas exigencias. Aunque, debido al cambio del espacio factible por las nuevas restricciones, la solución cambia un poco en los logros obtenidos y ofrece una alternativa de 196 950 millones de pesetas, 18 744 481 jornales y 160 450 303 en el índice de desempleo. El decisor está conforme con esa solución y la registra. Puede terminar aquí el proceso o continuar verificando intercambios eficientes entre objetivos, e ir registrando las que le parezcan interesantes. Puede además, ir verificando, en cualquier parte del proceso, el estado de algún embalse, demanda o cultivo específico para la solución actual o registrada. El resultado obtenido por este proceso de aprendizaje y selección es mucho más confiable para el decisor y podrá implementarlo luego con la confianza de que sus deseos reales están reflejados en él.

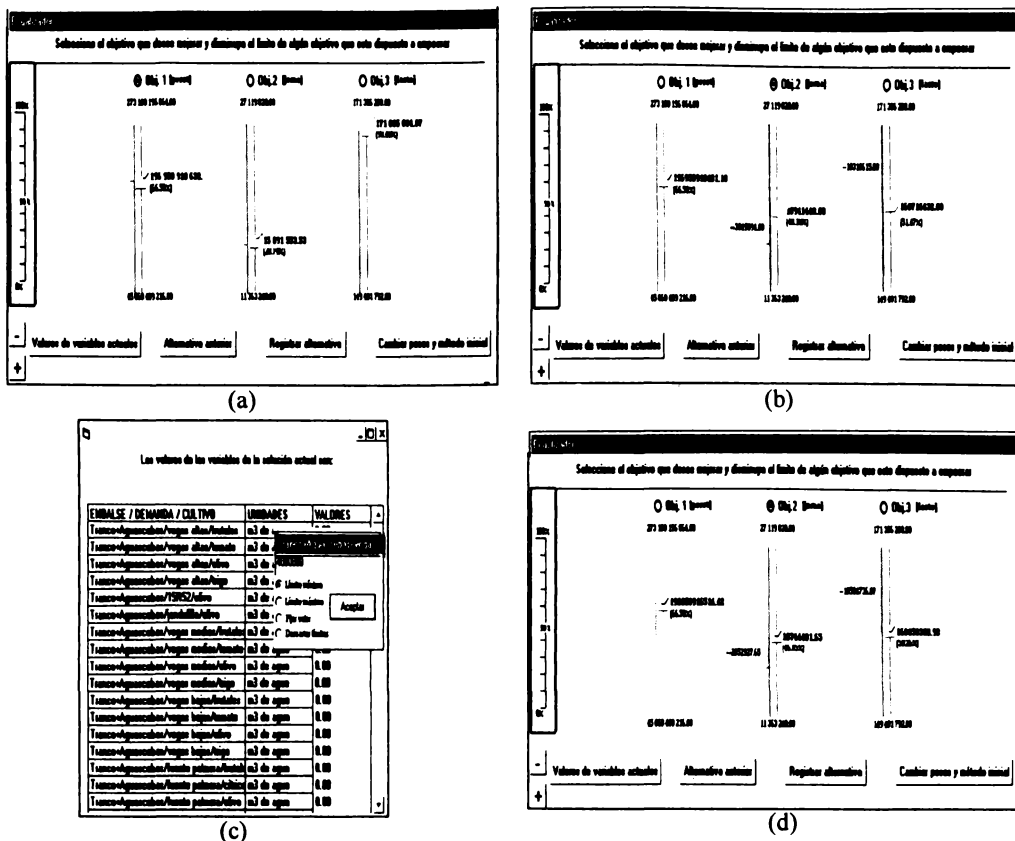


FIGURA 8. Proceso simulado con el ECUALIZADOR.

5. CONCLUSIONES

Se diseñó y elaboró un sistema soporte para la toma de decisiones con múltiples objetivos para el uso específico en la asignación de agua para diferentes usos con múltiples objetivos, en el que se integraron herramientas de toma de decisiones clásicas y herramientas novedosas desarrolladas en el proyecto, con las que se solventaron muchos de los problemas típicos de las metodologías hasta ahora conocidas. Estas herramientas usan como marco de trabajo una interfaz amigable al decisor, fácil de entender y manipular y que ofrece información valiosa y suficiente para una buena toma de decisión.

Mediante la aplicación a la asignación de agua para riego en la cuenca del Guadalquivir se demostró la utilidad del sistema soporte específicamente en problemas del sector agrícola, que es uno de los sectores más vulnerables al manejo del agua.

M. Naredo. Madrid . Fundación Argenteria y VISOR.

Smith R., Mesa O., Dyner I., Jaramillo P., Poveda G. y Valencia D. 2000. Decisiones con múltiples objetivos e incertidumbre. 2ª edición. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Posgrado Recursos Hidráulicos. 2000.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Alcaide M., y Muñoz, F. 1985. Distribución y uso del agua de riego en el Bembézar. Problemática y estudio de soluciones. ITEA. No 59, p. 39-54.
- Calatrava J., Domingo, J. y Ruiz, P. 1981. El empleo de la mano de obra en los regadíos del valle medio del Guadalquivir: El caso de Posadas (Córdoba). Departamento de Economía y sociología Agrarias, C.R.I.D.A 10.I.N.I.A. Gerardo de las Casas Gómez D.G.P.A. Córdoba.
- Delannoy J. J. 1990. Agua y regadíos en Andalucía. Sevilla. Universidad de Sevilla – Casa de Velázquez.
- Jaramillo P. 1999. Desarrollo de un Sistema Soporte a la Decisión para la Asignación de Recursos Naturales con Satisfacción de Múltiples Objetivos y Múltiples Decisores. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Martín Mendiluce J. M. 1997. Un posible escenario del futuro de los regadíos españoles. En: *Ingeniería Civil*, Vol. 103, p. 5-16.
- Roldán J., Reca, J. y Losada, A.. 1997. La gestión del agua del riego. capítulo: Uso del agua de riego en el valle del Guadalquivir: zonas de Bembezar y de Fuente Palmera. Editado por J. López Gálvez y J.

