

LOS SISTEMAS SOPORTES DE DECISION EN LA PLANIFICACION Y GESTION RACIONALES DE LOS RECURSOS HIDRICOS

Joaquín Andreu¹, José Capilla², Francisco Cabezas³

¹ Departamento de Ingeniería Hidráulica y M.A., Universidad Politécnica de Valencia

² Departamento de Física Aplicada, Universidad Politécnica de Valencia

³ Confederación Hidrográfica del Segura, DGOH del MOPTMA

RESUMEN: La utilización racional del agua implica una gestión eficiente, integral y sostenible del recurso. Los sistemas de recursos hídricos y las soluciones para aliviar sus problemas son cada vez más complejos. Por consiguiente, a efectos de analizar los sistemas de forma integrada y de abordar incertidumbres clásicas relacionadas con los usos, demandas o recursos, así como nuevos temas tales como impactos de posibles cambios climáticos, será necesario utilizar herramientas tecnológicamente avanzadas. El desfase existente actualmente entre el estado del arte del análisis de sistemas de recursos hidráulicos y la práctica cotidiana de la toma de decisiones en el mundo real puede y debe reducirse. La factibilidad y realidad de este proceso es demostrada en este artículo, en el que se describe un sistema soporte de decisión para recursos hídricos, que está siendo utilizado en la actualidad en la Confederación Hidrográfica del Segura para responder a cuestiones enfocadas al uso racional del agua. Después de una breve descripción de la problemática de la cuenca, se llega a la conclusión de que, en sistemas tan complejos, el uso de herramientas como la que se describe es, más que algo conveniente, la única posibilidad de analizar con éxito la planificación y las políticas de gestión del sistema, obteniendo una idea del rendimiento y de la fiabilidad del mismo. El sistema soporte incluye dos módulos principales: un módulo para la optimización de esquemas de sistemas de recursos, y un módulo para la simulación de la gestión de dichos sistemas incluyendo el uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas. La creación de esquemas y la introducción de datos, así como el análisis de resultados, se ven facilitados por interfases y postprocesadores gráficos interactivos. La aplicación de estas herramientas en una cuenca tan compleja como la del Segura tiene a su vez un efecto de promoción de su uso en otras cuencas, confirmando que, bajo ciertas condiciones, herramientas tecnológicamente avanzadas pueden ser usadas y aceptadas en la práctica cotidiana de la planificación y gestión hidrológicas.

INTRODUCCION

Al igual que en muchas otras partes del mundo, en España la complejidad de los problemas relacionados con el agua crece día a día. Asimismo, la complejidad de las soluciones necesarias para resolver dichos problemas es creciente. Los usos del agua, así como los objetivos que se pretende satisfacer son múltiples. La mayor parte de las soluciones estructurales más fáciles ya han sido llevadas a cabo. Además, en la actualidad, nuevas soluciones estructurales son objetadas por algunos sectores de la sociedad, y los trasvases entre cuencas

encuentran una creciente oposición social.

Bajo estas circunstancias, y antes de emprender nuevos desarrollos estructurales y trasvases, es de crucial importancia asegurarse de que se está llevando a cabo una gestión racional de los sistemas existentes. Un desarrollo eficiente, integrado y sostenible de los recursos hídricos ha de prevalecer ante la vía fácil de echar más hormigón en las cuencas. Esto no quiere decir que, si después de aplicar estos criterios, se demuestra la necesidad de soluciones de tipo estructural, estas no se lleven

a cabo, sino todo lo contrario, se habrán de llevar a cabo porque estará demostrado que son razonablemente necesarias.

A los efectos de analizar la planificación y gestión de sistemas complejos es esencial que se utilicen las herramientas más avanzadas posible. En España, como en cualquier otro país, por muy desarrollado que este sea, existe un inevitable desfase entre el estado del arte del análisis de sistemas de recursos hídricos y la práctica del día a día en los organismos encargados del tema. La existencia de este desfase está perfectamente justificada, y su falta implicaría o bien que la investigación y la tecnología no progresa, o bien que los profesionales dedicados a la práctica cotidiana disponen de suficiente tiempo como para permitirles estar perfectamente al día, cosa que no suele ser habitual en la mayor parte de los casos. No obstante, si bien es imposible anular el mencionado desfase, a no ser que el desarrollo tecnológico se detenga, es nuestra convicción el que en nuestro país, al igual que en otros muchos, puede reducirse muchísimo en un futuro muy próximo.

Esta convicción está basada por un lado en el hecho de que se han experimentado muchos avances en el mundo de los ordenadores que permiten el desarrollo de Sistemas Soportes de Decisión (SSD) mucho más amigables para el usuario que hasta hace poco. Entre otras cosas, esto significa:

- Unas capacidades gráficas, velocidades de cálculo, capacidades de memoria central, así como medios de almacenamiento muy mejoradas, y a unos precios relativamente bajos.
- Mejores y más poderosos desarrollos de software básico comercial, como, por ejemplo, compiladores, sistemas de información geográficos (SIG), conchas de sistemas expertos, etc.

Por otra parte, las nuevas generaciones de técnicos y encargados de tomar decisiones que trabajan en las instituciones relacionadas con los problemas del recurso agua ya han tenido cierta dosis de ciencia de la computación en su educación. Por lo tanto, no son tan reacios a aceptar la ayuda que un sistema soporte a la decisión basado en ordenador puede proporcionarles, con plena consciencia de las limitaciones propias de los ordenadores.

Con el fin de demostrar que la reducción del desfase puede ser conseguida, se presenta a continuación un SSD en la vanguardia de la tecnología utilizado en la cuenca del Segura para una planificación y gestión más racional del recurso agua.

SITUACIÓN ACTUAL DE LA CUENCA DEL SEGURA

Antes de exponer la aplicación de técnicas y modelos de planificación, se resume a continuación la singular problemática existente en la cuenca del Segura, ampliamente descrita en su Proyecto de Directrices para el Plan Hidrológico (CHS, 1992). En síntesis, puede destacarse que:

- a) La superficie actualmente regada asciende a unas 260.000 hectáreas. De éstas, un 39 % se riega con aguas superficiales, un 17 % con aguas subterráneas, un 1 % con reutilización de recursos, y un 43% con aguas de origen mixto. Esta gran fracción regada con aguas de múltiples orígenes, que es mezclada en estas zonas regables según la coyuntura y disponibilidad de los recursos en los distintos años y épocas del año, implica especiales dificultades para un completo control de los consumos reales y los volúmenes aplicados a cada zona de cada fuente de recursos.
- b) La demanda agrícola neta, promediando zonas y cultivos, correspondiente a estas superficies regadas puede estimarse en 1.150 hm³ (dotación media neta de 4.400 m³/ha.año). Con un coeficiente de eficacia global calculado de 0,61 (dotación bruta media de 7.200 m³/ha.año). Esto supone unos requerimientos totales brutos de 1.850 hm³ al año con destino a la agricultura. Por otra parte, el agua actualmente aplicada, con las graves incertidumbres a que se ve sometida esta magnitud en los últimos años, se estima en unos 1.320 hm³ (350 hm³ propios de cabecera, 200 aportados por el trasvase, 200 de afluentes y el propio río fuera de la cabecera, 470 de aguas subterráneas extraídas mediante bombeo, y 100 de reutilización de todo tipo de retornos), lo que supone un déficit para usos agrícolas de 530 hm³, que se suple, fundamentalmente, con infradotación de cultivos, abandono de superficies, eventualidad, y falta de la adecuada garantía.
- c) La demanda urbana, incluyendo usos domésticos, servicios públicos y suministros a industrias sin fuentes propias de abastecimiento y conectadas a la red, asciende a 211 hm³/año, de los que 192 se sirven por la Mancomunidad de Canales del Taibilla, 10 se captan directamente de ríos, y 9 se captan de pozos. La evolución de estos últimos años revela crecimientos de esta demanda en torno al 6-10 % anual, fundamentalmente debidos al enorme desarrollo económico y turístico de amplias zonas de la cuenca. Con la situación concesional actual, la M.C.T. dispone, fundamen-

talmente, de los recursos del río Taibilla y los concedidos procedentes del Trasvase (110 hm³/año), habiéndose complementado esta dotación con las menores pérdidas en el acueducto Tajo-Segura con relación a las previstas en las asignaciones legales iniciales. Se hace, por tanto, imprescindible la consideración de la demanda urbana servida por la M.C.T. como próxima a agotar la totalidad de sus recursos disponibles asignados, siendo este uno de los principales problemas a corto plazo planteados en la cuenca.

- d) Los recursos renovables de los acuíferos de la cuenca se estiman en 487 hm³ al año. La explotación anual por bombeo es aproximadamente de 468 hm³ (la misma cantidad que los recursos), de los que 312 (el 67%) proceden de las reservas de los acuíferos, y 156 (el 33%) proceden de los recursos renovables. Considerando que gran parte de la fracción no explotada por bombeos se recoge en los embalses de cabecera y es, de hecho, utilizada aguas abajo, puede comprenderse la delicadísima situación en que se encuentran numerosas zonas atendidas con recursos no renovables y de muy difícil solución. Estas zonas (Jumilla-Villena, Carche-Salinas, Quibas, Ascoy-Sopalmo, Valle del Guadalentín, Campo de Cartagena, Mazarrón-Aguilas, etc.) presentan problemas de descenso continuado de niveles, con su correspondiente secuela de reprofundización de sondeos, cambio de bombas, pérdida de caudales y, en muchos casos, degradación progresiva de la calidad hasta niveles inadmisibles. Como se ha indicado, la provisión de recursos suficientes a estas zonas es, en la situación de disponibilidades actuales, imposible.
- e) La compleja estructura de la red de regadíos tradicionales supone la reutilización de las aguas drenadas, bien excedentes del regadío, bien procedentes de la recarga del acuífero de las vegas media y baja del Segura, y recogidas por la red de azarbes. Esta sucesiva reutilización conlleva una degradación de la calidad hacia los aprovechamientos de aguas abajo, que alcanza su máximo en área de la vega baja, donde es preciso mezclar las aguas con otras de distinto origen para poder utilizarlas para riego.
- f) Como consecuencia de la evolución histórica, la situación concesional de los aprovechamientos en la cuenca es muy compleja, existiendo una casuística amplia y diversa. A ello se une la nueva necesidad de vigilancia y control de las aguas subterráneas, desde la entrada en vigor de la reciente Ley de Aguas.

- g) Es bien conocida la enorme irregularidad de los caudales de la cuenca, la especial violencia de sus episodios de crecida, y la persistencia y longitud de sus períodos de sequía.
- h) Debido a la intensa utilización de los recursos hidráulicos, se han agotado, prácticamente, las cerradas adecuadas para construir nuevas grandes presas con importante volumen de embalse. Salvo embalses de defensa contra avenidas, en general con pequeña capacidad, es muy difícil disponer nuevos almacenamientos que mejoren sustancialmente la regulación de la cuenca. A esto se suma la disminución de volumen de los existentes como consecuencia del aporte de sedimentos de sus cuencas vertientes, especialmente grave en esta cuenca con pérdidas de suelo medias mayores de 50 t/ha/año, y que supone una disminución de volumen de embalse del orden de 3 hm³/año.
- i) La evolución histórica de los aprovechamientos hídricos de la cuenca ha generado la existencia, en la actualidad, de cuatro redes de suministro de recursos, diferentes pero interconectadas entre sí: la red tradicional de las vegas del Segura y Guadalentín, la red de abastecimiento de la M.C.T., la red de canales del Postravase Tajo-Segura, y una cuarta red de captación y distribución de aguas subterráneas, que puede considerarse superpuesta a los anteriores. La complejidad de las relaciones e interconexiones entre las redes es muy considerable, y, en general, todas presentan problemas importantes de disponibilidad de recursos y explotación y gestión de los mismos.

UTILIDAD DE LA APLICACIÓN DE SISTEMAS SOPORTES DE DECISIÓN

En un entorno hidráulico como el descrito anteriormente, caracterizado por la escasez de recursos y la complejidad de su funcionamiento, incluyendo una fuerte relación entre aguas superficiales y subterráneas, la única forma de evaluar y diseñar estrategias de planificación y de gestión que resuelvan los problemas existentes es mediante la aplicación de modelos de simulación y optimización. Las razones en que se basa esta afirmación son varias.

En primer lugar, y al margen de sus resultados prácticos concretos, la formulación de modelos es un excelente ejercicio de comprensión de la realidad. En efecto, debe descomponerse la globalidad del problema en partes simples, cuyo comportamiento e interrelaciones debe ser dilucidado y formulado en forma analítica. Esto supone un esfuerzo de inteligibilidad que,

además de mostrar nuestro conocimiento de las cosas, muestra también nuestra ignorancia de las mismas, y las deficiencias de nuestra comprensión de su funcionamiento.

Por otra parte, la ya comentada existencia de distintas fuentes de recursos con gran interconexión entre las mismas (zonas de demanda atendidas por aguas superficiales y subterráneas que pueden proceder de diferentes embalses y pozos, y cuyos retornos van a parar a otra unidad de demanda), plantea una cuestión fundamental para la aproximación al análisis de la cuenca: no es posible, en general, la consideración de una demanda atendida por una fuente de recurso de forma aislada y separada del resto del sistema. Entre las implicaciones prácticas que esto origina se encuentra la imposibilidad de aplicar el análisis clásico de regulación de un embalse que atiende a una demanda, con objeto de determinar su garantía de servicio. Dados un embalse, sus leyes de entrada y salida y sus reglas de explotación, la determinación de la garantía de servicio, una vez definida esta, es trivial y "univariada". En nuestro caso lo realmente existente es un sistema altamente redundante y conexo que requiere definiciones y especificaciones de carácter "multivariado", no pudiendo, en general, darse cifras de regulación por cada embalse concreto, sino por la globalidad del sistema para una política general de explotación dada. Los modelos de gestión parecen las más adecuadas herramientas, si no las únicas, para manejar esta complejidad.

La interacción entre las aguas superficiales y subterráneas es obvia: un considerable porcentaje de los recursos drenados en cabecera, y que alimenta a los principales embalses tiene origen subterráneo. Las explotaciones de acuíferos del subbético y prebético, generalmente drenado en manantiales sobre ramblas y afluentes del curso medio del río, afectan de modo directo a estos afluentes, secando sus fuentes. Los acuíferos en contacto con el cauce principal, sinclinal de Calasparra y Vegas del Segura, presentan interconexión hidráulica con el río, y pueden permitir un incremento de la regulación o de las disponibilidades en época de sequía mediante un plan de bombeos programados. Los modelos de uso conjunto ofrecen la posibilidad de evaluar estas alternativas.

La necesidad de una rigurosa evaluación de diferentes alternativas de regulación (infraestructuras básicas, nuevas presas y canales) o reglas de explotación (criterios para bombeos y desembalses) exige, inevitablemente, el apoyo de modelos de simulación, con la complejidad necesaria para abarcar los aspectos sustanciales del problema concreto.

CRITERIOS PARA LA APLICACIÓN DE MODELOS DE GESTIÓN

Los problemas y condicionantes básicos de la cuenca enumerados anteriormente suponen ciertas limitaciones o singularidades que deben ser tenidas en cuenta a la hora de diseñar y aplicar modelos de gestión en la zona. Es necesario que el modelo incorpore entre sus posibilidades la capacidad de tratar estas singularidades. Entre estas especificidades pueden destacarse:

- I) La posibilidad de atender una zona de demanda con recursos de distintos orígenes, como es el caso de numerosas unidades entre las que pueden contarse la mayoría de las zonas regables del trasvase.
- II) La capacidad de integrar los acuíferos en el esquema de gestión mediante un tratamiento de parámetros agregados, o, si fuese necesario y se dispusiese de información suficiente, en forma distribuida. En principio, y dada la situación de sobreexplotación generalizada, se tratarán en forma agregada todos excepto los del sinclinal de Calasparra y Vega Alta del Segura. Estos dos acuíferos se encuentran conectados con el río, están prácticamente sin explotar, y ofrecen claras posibilidades de integración con el esquema superficial, como se ha puesto de manifiesto en numerosos estudios e informes previos.
- III) La capacidad de trabajar con series sintéticas multivariadas generadas con un esquema de agregación-desagregación. Entre las series a integrar en el esquema se encuentran las de la cabecera del Tajo, alimentadoras de los embalses origen del Acueducto Tajo-Segura. Por el conocimiento que se tiene en estos momentos, existe una significativa correlación estadística entre los recursos de cabecera de las cuencas del Tajo y Segura, y una investigación de las políticas de gestión del A.T.S. que considere este hecho y simule alternativas parece muy interesante en estos momentos.
- IV) La posibilidad de asignar diferentes prioridades a distintos usos, y dentro de los distintos usos, a distintas zonas, intentando reproducir la complejidad de la situación concesional.
- V) La capacidad de incorporar los aprovechamientos hidroeléctricos al esquema general.

Además de estos requerimientos técnicos, se ha considerado necesario el disponer de un módulo previo simplificado que permita, con una estructura muy

simplificada de la red, realizar una primera optimización y encaje del problema, antes de abordar el modelo completo.

En el esquema conceptual del modelo de simulación se ha considerado conveniente incluir hasta 16 embalses (13 en la cuenca del Segura, 2 en el subsistema de distribución del postrasvase y 1 en la cabecera del río Tajo). Se incluyen también 19 unidades acuíferas, 10 de ellas conectadas hidráulicamente con el sistema superficial.

Para dar respuesta a esta necesidad de técnicas analíticas y herramientas potentes, en la Confederación Hidrográfica del Segura se está utilizando un sistema soporte desarrollado en la Universidad Politécnica de Valencia. El sistema, denominado AQUATOOL, incluye básicamente un módulo de optimización de cuencas y un módulo de simulación de cuencas. El sistema no es específico para una cuenca determinada sino que está previsto para uso general puesto que permite la representación de diferentes configuraciones del sistema de recursos hidráulicos mediante el diseño gráfico y la entrada gráfica de datos.

AQUATOOL: ESTRUCTURA GENERAL

AQUATOOL está actualmente implantado en ordenadores tipo PC compatibles (Andreu et al., 1993). La interacción entre el usuario y los modelos es conducida por el entorno Microsoft Windows, con un menú de iconos del primer nivel que incluye dos opciones:

- OPTIGES: Esta hace acceder al usuario al módulo de optimización.
- SIMGES: Esta hace acceder al usuario al módulo de simulación.

Con esta estructura el sistema permite al usuario hacer, entre otras cosas, lo siguiente:

- 1) Introducir y modificar si es necesario, en una forma gráfica la configuración de un sistema de recursos hidráulicos ya sea para optimización (módulo OPTIGES) o para simulación (módulo SIMGES). Esto incluye la posibilidad de obtener una copia en papel del diseño efectuado.
- 2) Introducir y gestionar bases de datos que contienen las características físicas de los componentes de los esquemas, así como las características de gestión.
- 3) Llevar a cabo una optimización de la gestión para

una alternativa dada y un tiempo horizonte dado utilizando diferentes datos hidrológicos.

- 4) Llevar a cabo una simulación de la gestión para una alternativa dada y un tiempo horizonte dado usando diferentes datos hidrológicos y también diferentes reglas de gestión.
- 5) Obtener los resultados de la optimización y de la simulación en forma de informe escrito, ya sea detallado para todo el tiempo horizonte o resumido como valores medios e indicadores de garantías.
- 6) Obtener los resultados de la optimización y de la simulación en la forma de gráficos de series temporales y gráficos de valores medios.
- 7) Obtener los resultados de la optimización y de la simulación almacenados en archivos que puedan ser utilizados como datos de entrada para cualquier tipo de postprocesador específico que no esté incluido en AQUATOOL.

Estas capacidades pueden ser utilizadas en un sistema de recursos hidráulicos para:

- a) Filtrar alternativas de diseño mediante el módulo de optimización.
- b) Filtrar alternativas de gestión mediante el uso del módulo de optimización obteniendo criterios de operación a partir del análisis de los resultados óptimos.
- c) Comprobar y refinar las alternativas filtradas mediante el uso del modelo de simulación.
- d) Llevar a cabo análisis de sensibilidad comparando los resultados después de cambios en el diseño o en las reglas de operación.
- e) Llevar a cabo análisis de riesgo simulando y/u optimizando con diferentes series sintéticas hidrológicas (análisis de Monte-Carlo).
- f) Ganar conocimiento del sistema en los aspectos físicos y de gestión. Y también ganar en el aspecto de organización de datos.
- g) Utilizar el modelo una vez que se implanta una alternativa como una ayuda en la operación del sistema de recursos hidráulicos (off-line), principalmente para reparto de recursos entre demandas conflictivas, y para estudiar impactos de cambios en el sistema.

OPTIGES: EL MÓDULO PARA OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE RECURSOS HIDRÁULICOS.

Este módulo tiene como núcleo al modelo **OPTIGES** de optimización de red de flujo para sistemas de recursos hidráulicos desarrollado en la UPV (Andreu, 1992). El modelo ha sido utilizado desde 1987 como un modelo de filtrado en varios casos reales. Básicamente el modelo acepta esquemas de recursos hidráulicos definidos mediante cinco tipos de elementos:

- Nudos sin capacidad de almacenamiento.- Estos permiten al usuario incluir uniones de ríos, puntos donde tiene lugar una incorporación hidrológica, puntos de derivación, y puntos de toma.
- Nudos con capacidad de almacenamiento.- Estos son para embalses. El usuario debe de dar la capacidad útil del embalse para los distintos meses dentro del año. También puede definirse una prioridad de almacenamiento.
- Canales.- Permite al usuario incluir canales naturales (tramos de río), así como canales y acequias y trasvases entre cuencas. Los caudales máximos mensuales han de ser definidos así como caudales mínimos mensuales. También se puede definir una prioridad para los caudales mínimos.
- Demandas.- El usuario debe definir la demanda mensual y una prioridad para cada demanda.
- Entradas hidrológicas.- Reflejan la entrada en el sistema correspondiente a las intercuenas entre el nodo donde se aplican y el nodo correspondiente a la entrada hidrológica más cercana aguas arriba. El usuario debe dar un nombre de un archivo que contenga los datos hidrológicos para cada entrada hidrológica.

Al menos según la experiencia en el uso del modelo, se puede decir que casi cualquier sistema de recursos hidráulicos puede ser representado de forma simplificada mediante estos elementos.

Una vez que el esquema se ha definido, juntamente con la longitud de tiempo a ser optimizada, el modelo construye una red de flujo conservativa interna que es optimizada mediante el algoritmo de out-of-kilter (Bazaraa and Jarvis, 1977). La función objetivo es la minimización de una suma ponderada de déficits de demandas y caudales mínimos. Los pesos o factores ponderantes reflejan las prioridades declaradas por el usuario.

A fin de facilitar la definición del sistema y entrada de datos se dispone de una interfaz gráfica. La interfaz permite la definición gráfica y/o edición del esquema

así como la introducción de datos relacionados con la física del sistema y con los aspectos de gestión. En las Figuras 1 y 2 pueden verse dos imágenes de la pantalla de trabajo. El usuario dispone de un papel de trabajo "de gran tamaño" el cual en un momento determinado está viendo a través de una "ventana". La ventana se puede mover sobre el papel. Seleccionando un elemento de entre los cinco tipos arriba mencionados del menú (Figura 1), el usuario puede colocarlo donde quiera en el papel. Una vez que el elemento es colocado, la interfaz presenta una ficha de introducción de los datos del elemento en una base de datos (Figura 2). Cuando esto está hecho cambia nuevamente a la definición gráfica del esquema. El usuario puede también seleccionar del menú opciones para cambiar de sitio o borrar un elemento ya definido así como cambiar sus datos. El esquema puede ser almacenado y más tarde recuperado. Puede también ser impreso o dibujado en plotter ajustando el tamaño de la imagen ya sea en papel A4 o A3. Finalmente, una opción del menú permite la ejecución del modelo **OPTIGES**.

OPTIGES produce resultados en forma de archivos que contienen informes escritos sobre datos de entrada, informe detallado de los valores óptimos de las variables, y resumen de la optimización, incluyendo valores medios y criterios de rendimiento (garantías). Opcionalmente todos o sólo algunos de estos informes pueden ser obtenidos. También se producen archivos ASCII que contienen los resultados de la optimización de forma que estén disponibles para otras aplicaciones específicas no previstas en **AQUATOOL**.

Finalmente, y no menos importante, los resultados pueden ser analizados en forma gráfica directamente desde la interfaz de usuario, de forma que señalando un elemento del esquema, como por ejemplo un embalse, se puede solicitar inmediatamente después de la ejecución del modelo un gráfico de la evolución del volumen de embalse para todo el período de optimización, como puede verse en la Figura 3, o bien de los valores medios mensuales del volumen embalsado, como puede verse en la Figura 4. Estos gráficos son de gran ayuda cuando se está analizando soluciones para poder lidiar con la enorme cantidad de resultados numéricos y para poder diseñar reglas de operación que deben de ser inferidas de la conducta óptima. Pueden obtenerse copias impresas de los gráficos y tablas simplemente pulsando un botón en la pantalla de la interfaz. De la misma forma puede obtenerse en pantalla una tabla con los resultados numéricos para el elemento en cuestión.

El módulo de optimización **OPTIGES** se ha utilizado en la cuenca del Segura como modelo de filtrado usando esquemas simplificados de alternativas que re-

flejan la inclusión o exclusión de diferentes instalaciones planificadas, y diferentes escenarios de demanda y cantidades de recursos importados. La Figura 5 muestra uno de tales esquemas. Sólo seis de los principales embalses han sido incluidos, las demandas han sido agregadas en diez zonas. En la alternativa representada en la figura, los embalses en los nudos 6 y 14 son embalses inexistentes que estaban planificados.

El análisis de los resultados, para el cual son de mucha ayuda los gráficos obtenidos con el postprocesamiento, ha dado, entre otros los siguientes frutos:

probaron ser bastante robustos.

También los resultados del modelo tendrán una gran extensión. Por lo tanto no es necesario explicar la importancia que cobra un postprocesador gráfico adecuado.

El núcleo de este módulo es el modelo SIMGES, un modelo matemático que realiza la simulación de la gestión del sistema en base mensual. Con el fin de utilizar el modelo, hay que proporcionar un esquema de usuario. El esquema puede tener cualquiera de los

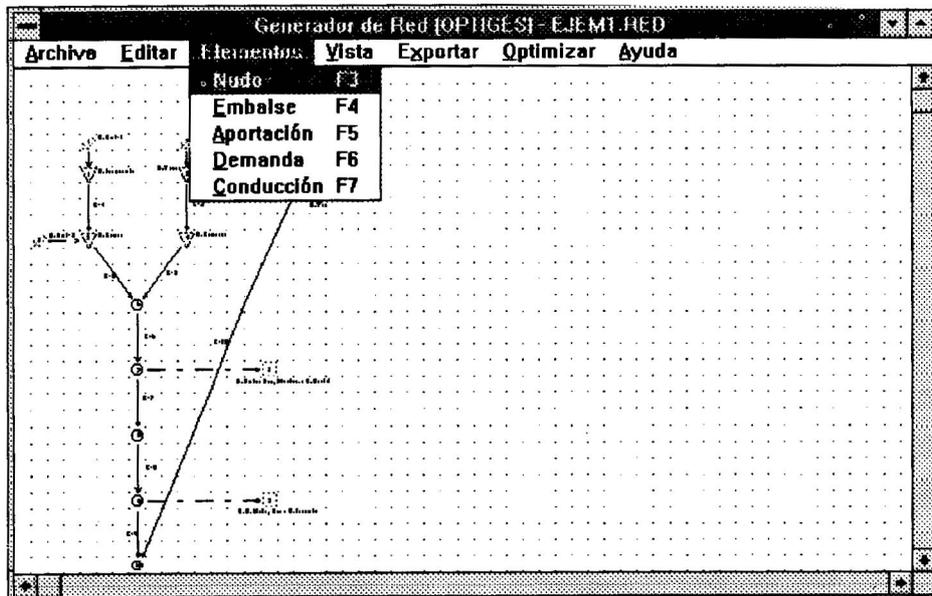


Figura 1. Menú Principal, menú de elementos

- Conclusiones preliminares referentes a la utilidad y tamaño de las nuevas facilidades: sólo se necesitan dos nuevos embalses por motivos de abastecimiento de agua, así como un nuevo canal conectando el embalse de La Pedrera (nudo 15) de vuelta al río Segura (nudo 16).
- Se diseñó una programación óptima de los trasvases de agua del río Tajo tal que minimizara conflictos con los usuarios en la cuenca del Tajo.
- Se obtuvieron reglas de operación para los principales embalses y conducciones en la forma de curvas objetivo de llenado y de caudales objetivo.

A estos resultados les fue realizado un análisis de sensibilidad ante cambios en algunos datos clave y

siguientes componentes:

- Nudos sin capacidad de almacenamiento.- De forma similar a OPTIGES, estos permiten al usuario incluir uniones de río así como entradas hidrológicas, derivaciones y tomas.
- Nudos con capacidad de almacenamiento.- Estos son para embalses superficiales. Se han de suministrar datos sobre valores máximos y mínimos de almacenamiento mensual, así como sobre evaporación, filtraciones, tamaño de desagües, etc.
- Canales.- Análogos a OPTIGES, pero en este caso se proporcionan tres tipos de canales:
 - a) Canales sin pérdida ni conexión con el acuífero;

- b) Canales con pérdidas por infiltración que van a parar a un acuífero;
- c) Canales con conexión hidráulica con un acuífero. Dependiendo de los niveles piezométricos, el acuífero puede detraer caudales del río o viceversa.

■ Demandas consuntivas.- Por ejemplo zonas

tros necesarios para calcular la producción eléctrica, así como por sus caudales objetivos mensuales.

■ Acuíferos.- Las aguas subterráneas pueden ser incluidas utilizando los siguientes tipos de modelo:

Descripción de la conducción

Nombre:

Resultados en archivo gráficos

Número prioridad caudal mínimo:

Coef. lc

Conduc. normal

By-pass

Defln. Usuario

		Caudal mínimo (Hm ³ /mes)		Caudal máximo (Hm ³ /mes)		Kot asignadas por el usuario	
Oct	Abr	0	0	1000	1000		
Nov	May	0	0	1000	1000		
Dic	Jun	0	0	1000	1000		
Enc	Jul	0	0	1000	1000		
Feb	Ago	0	0	1000	1000		
Mar	Sep	0	0	1000	1000		

Déficit Fallo (%)

Niveles Caudal Mínimo

Aceptar **Cancelar**

Figura 2. Ficha de introducción de datos para un elemento tipo conducción

regadas o zonas municipales e industriales. Las demandas mensuales son datos. La demanda puede ser suministrada hasta por tres tomas diferentes del sistema superficial, con diferentes eficiencias de riego y con retornos superficiales a distintos puntos del sistema. También la zona tiene la posibilidad de bombear de un acuífero con una capacidad máxima de bombeo dada. El usuario también puede asignar un número de prioridad a la zona. Zonas diferentes con la misma prioridad pertenecerán al mismo grupo de usuarios. El modelo tratará de repartir el agua dentro de un mismo grupo proporcionalmente a la demanda de cada usuario.

■ Plantas hidroeléctricas (demandas no consuntivas).- Hacen uso del agua pero no consumen ninguna cantidad significativa. Se definen por su capacidad máxima de caudal y por los paráme-

- a) Tipo depósito. No hay ninguna otra descarga del acuífero más que el agua que se bombea.
- b) Acuífero con descarga a través de un manantial.
- c) Acuífero con conexión hidráulica a un cauce superficial, modelada como acuífero unicelular.
- d) Acuífero con conexión hidráulica a un cauce superficial, modelada como acuífero multicelular.
- e) Modelo distribuido de un acuífero utilizando el método de los autovalores (Andreu y Sahuquillo, 1987)

■ Otros tipos de elementos incluidos son elementos de retorno, instalaciones de recarga artificial e instalaciones adicionales de bombeos.

SIMGES: EL MÓDULO PARA LA SIMULACIÓN DE LA GESTIÓN DE SISTEMAS DE RECURSOS HIDRÁULICOS

SIMGES es un módulo para simulación de la gestión, lo cual implica:

- Una representación más detallada del sistema de recursos hidráulicos que en el modelo OPTIGES. Por consiguiente se prevén más tipos de elementos, y las características físicas de los elementos han de ser descritas con más detalle.
- Las reglas de operación para cada elemento y para el sistema como todo han de ser proporcionadas por el usuario.

Esto hace el proceso de la entrada de datos mucho más laborioso. Aquí la importancia de una interfaz gráfica que incluya la base de datos es mayor, con el fin de facilitar el trabajo y evitar errores.

Además de las características físicas de los componentes el usuario debe dar las reglas de operación para elementos individuales así como para el sistema. Esto se realiza por medio de los siguientes dispositivos.

- Curvas objetivo de volumen y zonado de embalse. Cada embalse tendrá una curva definida por el usuario. También se darán volúmenes mínimos y volúmenes máximos mensuales. Estos últimos usualmente deben su variación a objetivos de control de avenidas.
- Relaciones interembalses.- Se definen prioridades para los diferentes embalses. Como es normal en este tipo de reglas de operación, todos los embalses se mantienen normalmente en la misma zona de llenado siempre que sea posible, y embalses con prioridades inferiores desvían antes a zonas menores que embalses con prioridades mayores.
- Caudales mínimos objetivo para canales. Normalmente son caudales ecológicos.
- Suministros objetivo para zonas de demanda.
- Caudales objetivo de turbinado para plantas hidroeléctricas.

- Relaciones entre demandas, explicadas arriba como prioridades de toma.
- Relaciones entre canales, dadas también por prioridades.
- Relaciones entre elementos. Se puede definir prioridades relativas entre las demandas, caudales mínimos y almacenamientos de embalses.

Con todos estos dispositivos es posible representar casi cualquier regla de operación compleja para un sistema,

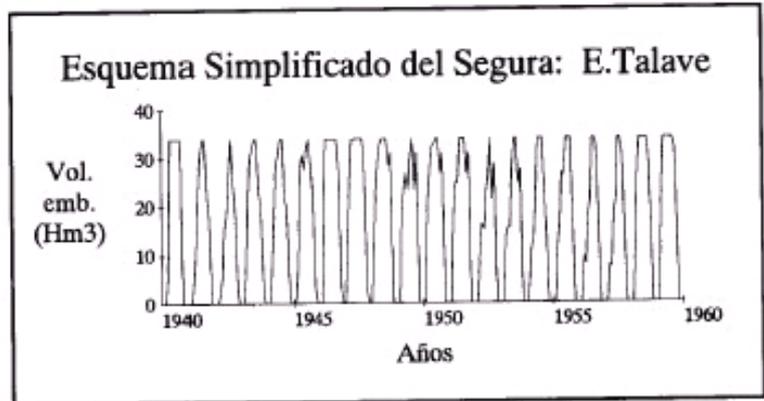


Figura 3. Serie temporal para el período horizonte completo

como demuestra la experiencia.

Para tomar las decisiones que afectan a los distintos elementos para cada mes particular, el modelo utiliza un submodelo de optimización. Utilizando los datos suministrados por el usuario sobre el esquema del sistema y las reglas de operación anteriores, el modelo produce una red de flujo interna conservativa. Cada elemento del esquema del usuario produce un conjunto de arcos y nodos diseñados para simular las características físicas del elemento, así como las reglas de gestión. Esta red interna, que no es vista por el usuario, es optimizada utilizando el algoritmo de out-of-kilter. El resultado es la asignación de aguas a diferentes usos tal que minimiza la suma ponderada de las desviaciones de los objetivos. Los factores ponderantes dependen de las prioridades.

Una vez que las decisiones han sido obtenidas, se lleva a cabo la simulación de los acuíferos. Puesto que esta simulación produce valores para las relaciones aguas superficiales-aguas subterráneas, estas se actualizan en la red, que vuelve a ser optimizada de nuevo, continuando este proceso iterativo hasta que se alcanza convergencia. El proceso iterativo permite, además,

que otros procesos no lineales sean incluidos, como por ejemplo la evaporación e infiltración de embalses y tramos de río.

Asimismo, con el fin de facilitar la definición del sistema y la entrada de datos para el modelo SIMGES, se ha desarrollado una interfaz gráfica. Todas las explicaciones dadas para la interfaz de OPTIGES son de aplicación aquí. Las únicas diferencias son que hay más tipos de elementos y que normalmente se requieren más datos para cada elemento.

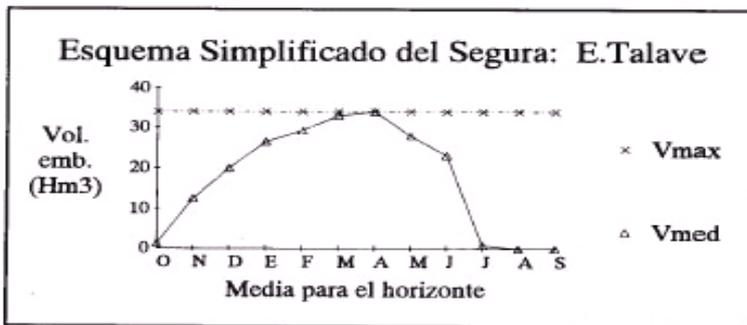


Figura 4. Valores medios mensuales

Tal como sucedía en el módulo OPTIGES, el módulo SIMGES produce archivos que contienen informes escritos de distintos tipos, y archivos que contienen los resultados de la simulación para aplicaciones específicas no incluidas en AQUATOOL. Así mismo, también se dispone desde la interfaz de la posibilidad de obtener inmediatamente después de una simulación la representación gráfica de los resultados para elementos determinados del esquema, ya sea en forma de series temporales o en forma de valores medios mensuales. Estos últimos gráficos también reflejan las curvas de operación dadas por el usuario, como puede verse en la Figura 6.

El modelo SIMGES se ha utilizado en la cuenca del Segura, después del filtrado con el modelo OPTIGES, con esquemas más detallados a fin de refinar y validar las alternativas filtradas y realizar un análisis de riesgo. Esta vez, los esquemas del sistema son mucho más complejos, ya que así lo permite el modelo de simulación. La Figura 7 muestra uno de estos esquemas. Todos los embalses y demandas, así como canales, han sido incluidos. También se han incluido los acuíferos. El esquema de la Figura tiene 16 embalses, 18 entradas hidrológicas, 93 canales, 50 demandas, 4 plantas hidroeléctricas, 19 acuíferos y

5 instalaciones de bombeo adicional. Se utilizan datos hidrológicos históricos, así como series sintéticas. La complejidad del sistema es evidente en la figura.

El análisis de los resultados, de nuevo facilitado por los gráficos producidos por los postprocesadores, permite obtener conclusiones finales sobre los puntos mencionados arriba como conclusiones infraestructurales. Consiguientemente los tamaños de las nuevas instalaciones han adoptado valores definitivos, las reglas objetivo de embalses y de caudales se han confirmado, y la garantía del sistema bajo diferentes escenarios ha sido evaluada.

Además, el modelo ha demostrado ser útil como un marco adecuado para discusión cuando aparecen conflictos en el sistema. Estos conflictos pueden estar relacionados con asignación de recursos, derechos de agua, o modificación de acuerdos, relaciones aguas superficiales-aguas subterráneas.

CONCLUSIÓN

Parece un sentimiento cada vez más generalizado el de que "los problemas del agua" no pueden seguir siendo vistos como los problemas del desarrollo de nuevas infraestructuras, nuevas fuentes de suministro y nuevos trasvases, reduciendo la cuestión a construir un embalse o abrir un canal. Cada vez en mayor número de áreas en el mundo, la construcción de nuevos embalses no aporta nada significativo a la mejora de la regulación. Por contra, cabe el peligro de una sobregulación, en la que las pérdidas de los embalses anule las ventajas del almacenamiento. En otras áreas, las restricciones económicas o ambientales, o incluso el creciente chauvinismo y sentido de la pro-piedad del recurso de regiones ricas en agua, pueden suponer obstáculos casi insalvables para lo que tradicionalmente se ha llamado el "desarrollo" de los recursos hidráulicos. De aquí el interés que conceptos más amplios, como los de planificación y gestión, en que el interés se centra en la utilización y economía de un recurso del medio natural, estén recibiendo atención creciente.

Finalmente, y en el contexto específico de la cuenca del Segura, su carácter de cuenca semiárida y con recursos escasos hace de la planificación hidrológica una tarea particularmente difícil e ingrata. En efecto, más que organizar el orden temporal y el diseño y dimensionamiento más adecuado para acometer el desarrollo cuantitativo y cualitativo de los recursos hidráulicos no explotados de la cuenca a medida que

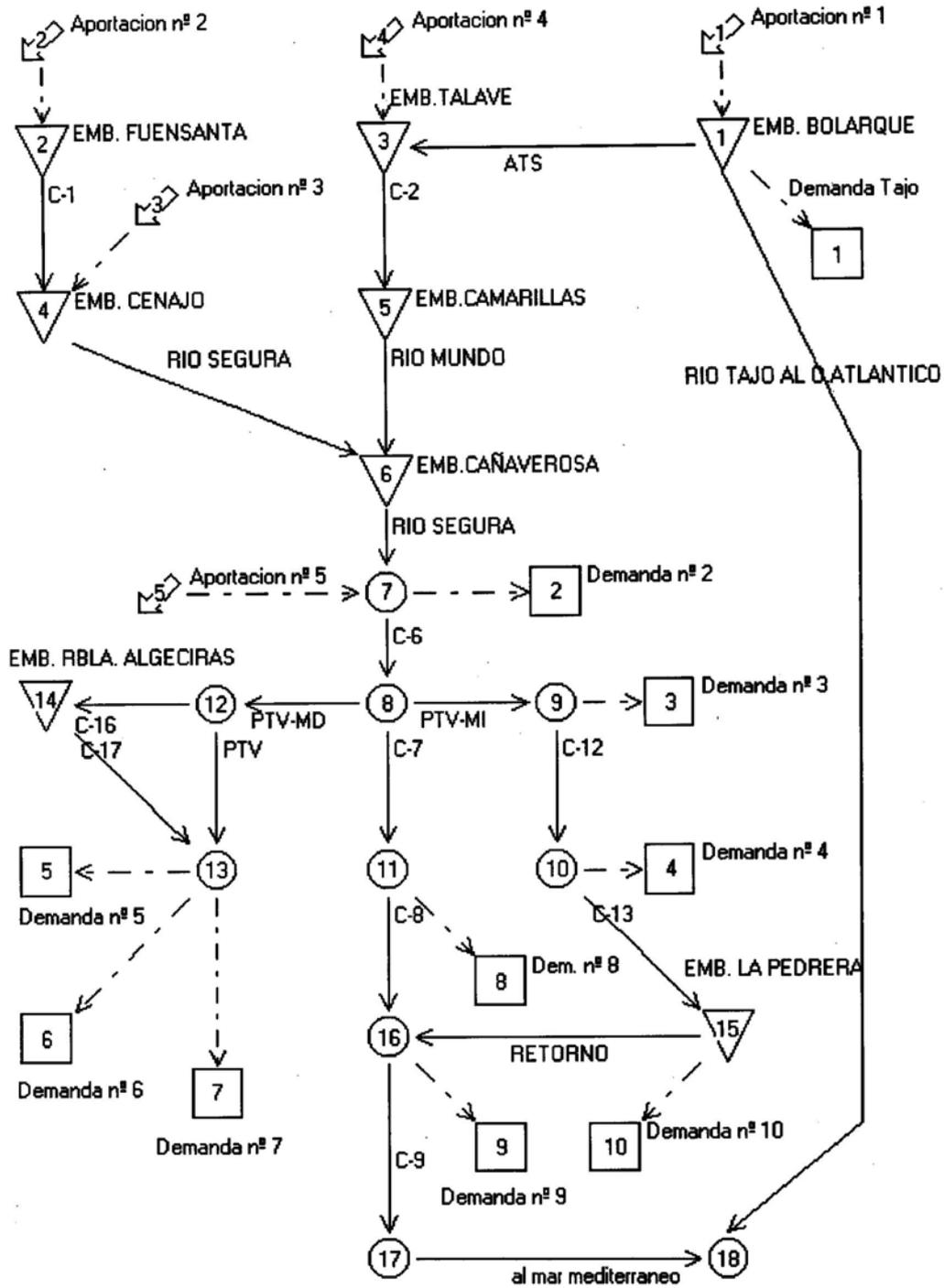


Figura 5. Ejemplo de un esquema de una alternativa optimizada con OPTIGES

las necesidades van aumentando, en estas zonas deficitarias no quedan prácticamente nuevos recursos que movilizar, y la tarea de planificación consiste a menudo, en el desagradable trabajo de distribuir déficits.

En la cuenca se ha alcanzado ya una situación en la que la totalidad de los recursos, no ya demandados, sino realmente aplicados, ha sobrepasado el límite de la producción anual renovable y explotable. Si el volumen actual de consumo de agua permanece en el tiempo, y no se procuran recursos externos, la desapa-

La complejidad de la cuenca del Segura y la experiencia habida con la utilización de AQUATOOL en la misma y en otros casos nos permite manifestar las siguientes conclusiones:

- El módulo de optimización OPTIGES ha demostrado ser una herramienta valiosa para filtrado de alternativas y para obtener guías de reglas de operación.

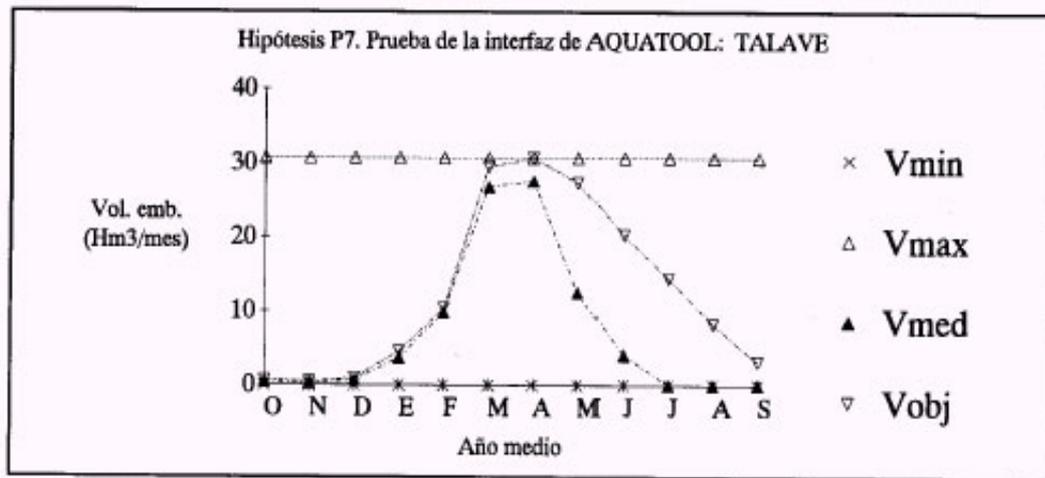


Figura 6. Valores medios mensuales simulados y curva objetivo de un embalse

rición de considerables reservas de recursos no renovables será un hecho inevitable, y de consecuencias irreversibles tanto sobre la cantidad como sobre la calidad de las aguas. Asimismo, la introducción de costosas técnicas de desalinización, hoy día no justificables en términos económicos, podría ser imprescindible en el futuro. En una situación así, la disponibilidad de técnicas analíticas potentes puede ser insustituible para la investigación de los aspectos tanto cuantitativos como cualitativos de los sistemas de recursos hidráulicos, a medida que va incrementándose la complejidad de los mismos.

En estos momentos se utiliza el sistema soporte de decisión AQUATOOL, desarrollado e implantado en microordenadores compatibles PC. El sistema ha sido diseñado como una ayuda a la gestión e investigación de recursos hidráulicos. Incluye un módulo de optimización, un módulo de simulación de la gestión y un módulo de preproceso de aguas subterráneas. El programa es interactivo-gráfico y puede ser utilizado para distintas configuraciones del sistema de recursos hidráulicos, sirviendo como una ayuda a fin de obtener criterios de diseño así como criterios de gestión.

- El módulo de simulación SIMGES es de gran ayuda para los tomadores de decisión para desarrollar un entendimiento mayor de la cuenca, como uno, y de sus subsistemas, y para estimar cambios en garantías debidos a cambios en condiciones estructurales o de gestión, entre otras cosas.

En la actualidad se sigue mejorando y poniendo al día los datos y configuraciones del sistema, con lo cual este sigue siendo útil para:

- Ganar mas conocimientos sobre las interrelaciones entre los diferentes subsistemas.
- Planificar la ampliación de las infraestructuras de regulación (embalses y trasvases).
- Proporcionar guías para la gestión del sistema para usos actuales y futuros.
- Proporcionar una medida de la fiabilidad del sistema para usos actuales y futuros.

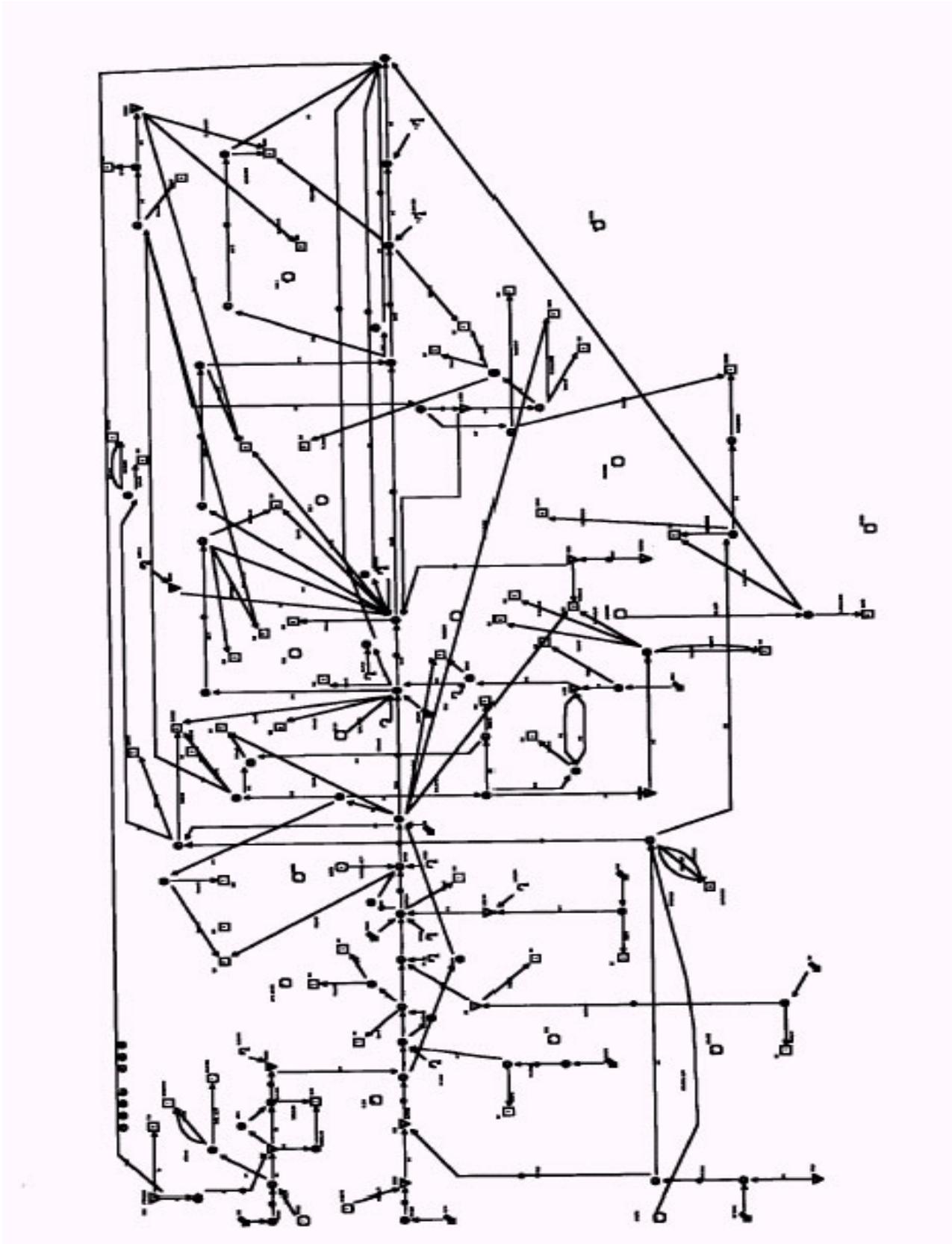


Figura 7. Esquema del usuario de SIMGES para la cuenca del Segura

- Proporcionar una ayuda implantada en ordenador para la operación del sistema en tiempo real para decidir repartos de agua para usos conflictivos y para estudiar impactos de cambios en el sistema, ya sea relacionados con las demandas, con los recursos o con las infraestructuras.

Como conclusiones aplicables a la planificación y gestión de recursos hídricos en cualquier cuenca podríamos extraer las siguientes:

- Nos encontramos inmersos en una época de transición de la era del desarrollo a la era del uso racional del agua. Esta racionalidad implica una gestión eficiente, integral y sostenible.
- Es necesario utilizar herramientas tecnológicamente avanzadas para analizar los sistemas de forma integrada contemplando incertidumbres clásicas relacionadas con usos, demandas, o recursos, así como nuevos temas tales como impacto de posibles cambios climáticos.
- El desfase actual entre los analistas de sistemas de recursos hídricos y la práctica cotidiana de la gestión ha de reducirse. Afortunadamente las bases para ello ya están asentadas. Los impresionantes desarrollos en el mundo de la informática permiten la creación, fácil uso y aceptación de sistemas soportes a la decisión basados en ordenador como el que se ha presentado, que son la mejor, si no la única, manera de abordar con éxito sistemas complejos de recursos hídricos.
- Desde luego, algunas condiciones adicionales han de darse para que la reducción del desfase sea efectiva y no se defrauden las expectativas. En el trabajo presentado estas condiciones han sido las siguientes:
 - Una comunicación muy estrecha entre las personas que han desarrollado el sistema soporte y los técnicos que lo han de utilizar en la agencia de cuenca. Esto garantiza que el producto final responderá a cuestiones que las personas de la agencia están abordando.
 - Un enfoque de trabajo que no pretenda resolver todos los problemas de golpe, sino de forma progresiva, yendo de cuestiones sencillas hacia las más complejas. De esta forma el desarrollo de herramientas en el sistema soporte responde a necesidades reales de los usuarios finales, y no a un ejercicio académico planteado en abstracto.

- o Que exista una documentación completa sobre las herramientas desarrolladas. Esta documentación incluye manuales de usuario para cada modelo matemático, así como para el sistema en su conjunto, manuales técnicos y ejemplos de aplicación.

Finalmente hemos de decir que la aplicación satisfactoria de estas herramientas en una cuenca compleja como la del Segura y su posterior difusión ha tenido el efecto de promocionar su uso en otras agencias gestoras del agua, tanto en España como en otros países. Esto confirma el que, si las anteriores condiciones se dan, las herramientas tecnológicamente avanzadas son bien aceptadas y utilizadas.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de **AQUATOOL** es la consecuencia de una continua actividad de investigación y modelación durante la última década en la UPV. Hay que agradecer debidamente a las personas e instituciones que han respaldado el trabajo, especialmente la Fundación Ramón Areces y la Confederación Hidrográfica del Segura. Así mismo, hay que agradecer a Sonia Sánchez el procesado de textos y figuras.

REFERENCIAS

- Andreu, J. (1992). Modelo **OPTIGES** de Optimización de la Gestión de Esquemas de Recursos Hídricos. Manual del Usuario. Serv. Publ. Univ. Politécnica. Valencia.
- Andreu, J. y A.Sahuquillo. (1987). "Efficient Aquifer Simulation in Complex Systems". Journ. of Water Res. Planning and Manag., Vol. 113, No. 1, 110-129.
- Andreu, J.; J.Capilla y J.Ferrer (1992). Modelo **SIMGES** de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos, Incluyendo Utilización Conjunta. Manual del Usuario. Serv. Publ. Univ. Politécnica. Valencia.
- Andreu, J.; J.Capilla; E.Sanchis y P.Tormo (1993). **AQUATOOL**: Sistema Soporte de Decisión para la Planificación de Recursos Hídricos. Manual del Usuario. Serv. Publ. Univ. Politécnica. Valencia.
- Bazaraa, M.S. and J. Jarvis (1977). Linear programming and Network Flows. John Wiley & Sons.
- Confederación Hidrográfica del Segura (1992). Plan Hidrológico. Proyecto de Directrices. Junio