

**PRIMER INFORME SOBRE LA
INCORPORACIÓN DE ACUÍFEROS EN EL
MÓDULO DE OPTIMIZACIÓN DE LA GESTIÓN
DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS**

-

**SITUACIÓN ACTUAL DE LA
OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE
RECURSOS HÍDRICOS**

Índice

1. Situación actual de la optimización de sistemas de recursos hídricos.	9
2. El problema de asignación de recursos hídricos y las redes de flujo. El modelo OPTIGES.	19
Referencias	25

Lista de figuras

Figura 1.1 Procedimientos de optimización estocástica implícita (a) y explícita (b). Traducidos de Labadie (2004)	11
Figura 2.1 Ejemplo de sistema de recursos hídricos	19
Figura 2.2. Representación del esquema de recursos hídricos en la figura 3.1 en forma de red de flujo	21
Figura 2.3. Grafo multiperiodo del sistema de recursos representado en la figura 2.1	22

1. Situación actual de la optimización de sistemas de recursos hídricos.

Un sistema de recursos hídricos se entiende, desde el punto de vista de la gestión del mismo, como un sistema uni o multi embalse compuesto por diversos componentes físicos tales como embalses, canales, túneles, tuberías, estaciones de bombeo, plantas hidroeléctricas, zonas de regadío y sistemas de suministro urbano (demandas), que se opera para suministrar agua para su uso urbano, agrícola e industrial, para la producción de energía hidroeléctrica, para el control de avenidas y para cumplir determinados requisitos ecológicos, sin olvidarnos de las necesidades de posibilitar la navegación o los usos recreativos.

La optimización de un sistema de recursos hídricos conlleva pues el reparto de los recursos, el desarrollo de estrategias de regulación de caudales y reglas de operación de embalses, y la toma de decisiones en tiempo real sobre qué desembalses realizar en base a las reglas de operación definidas (Wurbs, 1993). El objetivo final de la optimización del sistema es maximizar el beneficio, minimizar costes, suministrar a todas las demandas, a la vez que se cumple la ecuación del balance de masas del sistema, así como otras restricciones más particulares (Rani, 2010).

Para alcanzar estos objetivos resulta de inestimable ayuda la utilización de herramientas informáticas y modelos matemáticos que nos permitan (o faciliten) llevar a cabo el proceso de optimización. Aunque los modelos de simulación actuales nos permiten analizar cuestiones del tipo “¿qué pasaría si...?” relacionadas con el funcionamiento de diferentes alternativas de operación, no pueden, sin embargo, ayudarnos a obtener cuál es la mejor estrategia de utilización de dichas alternativas. Los modelos de optimización, por otro lado, sí que tienen esa capacidad de, sistemáticamente, seleccionar cuál es la solución óptima, o qué familia de soluciones lo es, bajo una serie de objetivos y restricciones predeterminados.

La principal tarea de un modelo de optimización es obtener el mejor valor (máximo o mínimo) de una función cuyos componentes representan variables de control (o decisión) así como diferentes parámetros que representen los diferentes pesos que pueden tener las variables anteriormente nombradas. Esta función recibe el nombre de función objetivo, y es el corazón de todo modelo de optimización (Wurbs, 1993). Una formulación generalista de una función objetivo sería (Labadie, 2004):

$$\max \text{ (o } \min) \sum_{t=1}^T \alpha_t f_t(\mathbf{s}_t, \mathbf{r}_t) + \alpha_{T+1} \varphi_{T+1}(\mathbf{s}_{T+1})$$

donde \mathbf{r}_t es el conjunto n-dimensional de variables de control (o decisión) durante el periodo t ; T es el horizonte de operación; \mathbf{s}_t representa el vector almacenamiento del sistema al inicio del periodo t ; $f_t(\mathbf{s}_t, \mathbf{r}_t)$ es la función objetivo a ser maximizada (o minimizada); $\varphi_{T+1}(\mathbf{s}_{T+1})$ es el término final representando los beneficios (o costes) futuros, más allá del horizonte de optimización; y α_t los factores de descuento para determinar el valor presente de los beneficios (o costes) futuros. Esta función objetivo, según las variables que se manejen, podrá ser lineal o no lineal.

El problema de optimización no termina con la función objetivo. Por lo general, la obtención de los valores de las variables de control también depende de cumplir una serie de restricciones como vienen a ser cumplir la ecuación del balance de materia o limitaciones de flujo máximo o mínimo. Por lo tanto, se optimizará la función objetivo (maximizándola o minimizándola) estando sujetos a las restricciones que limiten la selección de valores de las variables de decisión.

A diferencia con los modelos de simulación, la principal desventaja de los modelos de optimización es detalle de los mismos. Un modelo de simulación es capaz de representar gran cantidad de elementos presentes en una cuenca, mientras que un modelo de optimización, por la habitual mayor complejidad de los desarrollos matemáticos utilizados para su resolución, suele representar los esquemas de manera mucho más simplificada. Este aspecto hace que, en ocasiones, los resultados de los modelos de optimización se consideren de poca importancia o incluso se llegue a desconfiar de ellos debido a su escasa representatividad en el ámbito práctico (Labadie 2004). Sin embargo, el número de autores y organismos que sí observan la importancia de la optimización de sistemas de recursos hídricos no es reducido. En el propio Libro Blanco del Agua (MMA 2000) se comenta la necesidad de emplear modelos de optimización en el desarrollo de los planes de cuenca, al igual que modelos de simulación. Y una búsqueda a lo largo de los últimos años en la literatura científica muestra que la optimización de sistemas de recursos hídricos no es un tema excluido de la actualidad sino que supone un campo idóneo para la aplicación de las técnicas de optimización más avanzadas y/o recientes: Celeste (2009) explora las posibilidades de diversas técnicas de optimización estocástica para desarrollar curvas de operación para el embalse de Epitácio Pessoa en Brasil; Hinçal (2011) emplea los algoritmos genéticos para optimizar la producción de energía hidroeléctrica en un sistema con tres embalses del río Colorado en Estados Unidos; o Chandra (2009) que desarrolla un modelo híbrido de redes neuronales y lógica difusa para la operación óptima de un embalse en el río Pagladiya en India.

A lo largo de este capítulo se tratarán las diversas técnicas que, a lo largo de las últimas décadas, se han utilizado para resolver el problema de la optimización de sistemas de recursos hídricos. Dichas técnicas pueden dividirse en dos grandes familias, (1) la optimización estocástica implícita, y (2) la optimización estocástica explícita. Los métodos implícitos realizan la optimización a partir de series hidrológicas históricas o

sintéticas largas, o muchas cortas y similares (figura 1.1.a). De esta forma, la mayoría de los aspectos estocásticos del problema, incluyendo las correlaciones espaciales y temporales de las series hidrológicas, están incluidos de forma implícita y, por lo tanto, pueden emplearse directamente métodos de optimización determinísticos. La mayor desventaja del enfoque implícito es que las reglas de operación óptimas obtenidas son válidas únicamente para las series hidrológicas empleadas. Por otro lado, los métodos explícitos están diseñados para operar directamente con descripciones probabilísticas de flujos aleatorios (figura 1.1.b), en lugar de secuencias hidrológicas determinísticas. Esto significa que la optimización se realiza sin la presunción de conocer perfectamente cuáles serán los flujos futuros. Adicionalmente, las reglas de operación óptimas se determinan directamente, sin la necesidad de inferirlas posteriormente de los resultados de la optimización. Sin embargo, los métodos explícitos son computacionalmente mucho más exigentes que los implícitos.

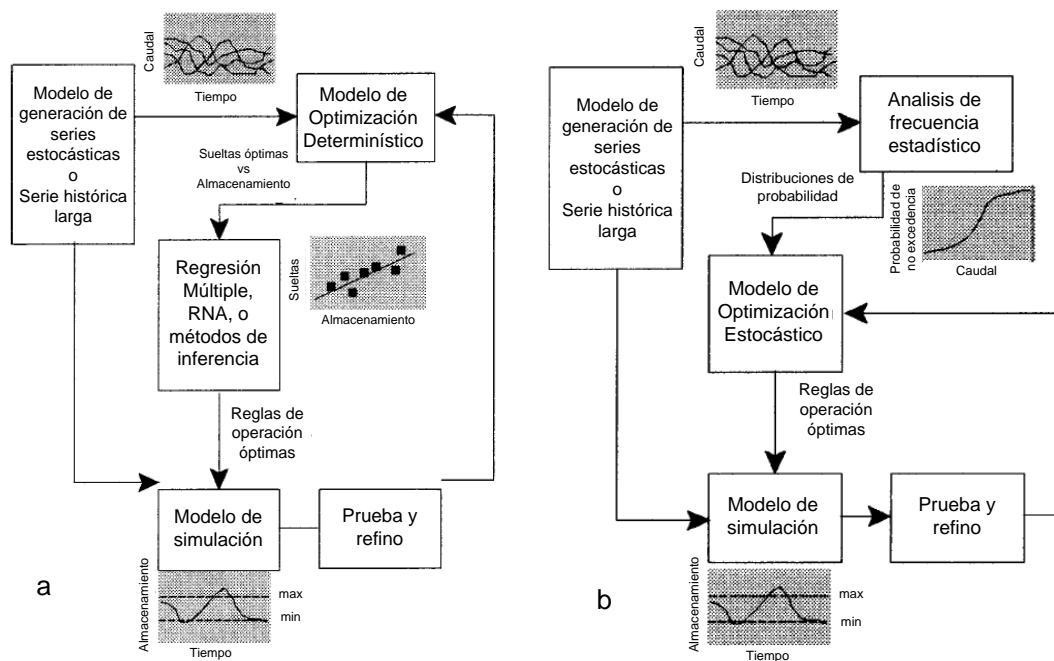


Figura 1.1 Procedimientos de optimización estocástica implícita (a) y explícita (b). Traducidos de Labadie (2004)

La programación lineal es una de las técnicas de optimización más empleadas en la modelación de sistemas de recursos hídricos (Rani, 2010). Se trata de un método de optimización estocástica implícita. Lo más atractivo de esta técnica es su flexibilidad de aplicación a problemas grandes, la convergencia a un óptimo global, la no necesidad de aportar soluciones iniciales, la existencia de una teoría dual sólida para realizar análisis de sensibilidad, y la disponibilidad de numerosas herramientas informáticas relativamente sencillas de utilizar ya creadas, o adaptadas, para su resolución, como por ejemplo CPLEX (IBM), GAMS (<http://www.gams.com>) o MATLAB (<http://www.mathworks.com>), que incluyen entre sus funciones algoritmos de resolución de problemas de programación lineal, aparte de funciones para otras muchas

técnicas relacionadas con la optimización, o no. Por otro lado, la principal desventaja de emplear la programación lineal es que tanto la función objetivo como las restricciones del problema deben ser lineales lo que, unido a que una gran cantidad de aspectos de los sistemas de recursos hídricos tienen un comportamiento no lineal, hace que sea necesario realizar una serie de simplificaciones, aproximaciones e iteraciones, que pueden derivar en un modelo poco preciso del sistema que se desee estudiar.

La programación lineal se puede enfocar también desde el punto de vista probabilístico. El enfoque determinista asume que todos los flujos y fenómenos aleatorios futuros se conocen de antemano. Una aproximación más realista es que las decisiones del primer periodo se pueden tomar con certeza, pero que las decisiones futuras y sus consecuencias son aleatorias. De esta forma puede formularse un problema en dos etapas que trata de minimizar los costes (o maximizar los beneficios) de la primera etapa conocida, más los costes esperados (o beneficios) de las futuras decisiones de una serie de escenarios futuros, cada uno con una probabilidad de ocurrencia asociada. El problema que presenta esta forma de proceder es que un gran número de posibles escenarios futuros resultará, como consecuencia, en un problema lineal extremadamente grande, con el evidente incremento del coste de cálculo.

Un ejemplo de aplicación de programación lineal a la optimización de un sistema de recursos hídricos se encuentra en Devi (2005), en el que se plantea un problema de programación lineal para el reparto de agua óptimo en la cuenca del río Subernarekha (India) de forma que se maximice el beneficio por riego y generación de energía hidroeléctrica. De igual forma, la programación lineal se ha empleado en el desarrollo del modelo de simulación de cuencas WEAP21 (Yates et al. 2005). Tomando como base dicho modelo, que resuelve el reparto óptimo de recursos de manera mensual empleando la programación lineal, se han llevado a cabo diversos estudios como los presentados en Léville (2003) para estudiar la gestión óptima de los recursos en la cuenca del río Olifante (Sudáfrica) en diferentes escenarios adaptados al inminente cambio climático.

Como ya se ha comentado, muchos sistemas de recursos hídricos no pueden modelarse de forma realista mediante la linealización de sus componentes, y deben atacarse directamente desde un punto de vista no lineal. Las no linealidades en sistemas de recursos hídricos se dan cuando existen relaciones complejas entre las diferentes variables físicas e hidrológicas, o debido a objetivos específicos que no varían de forma lineal a su satisfacción, un ejemplo habitual de esto es la inclusión generación de energía hidroeléctrica en la función objetivo o en las restricciones del problema. En este punto es donde se hace necesario el empleo de una técnica como la programación no lineal. Esta técnica es similar a la programación lineal, comentada en los párrafos anteriores, sólo que bien la función objetivo, alguna o varias de las restricciones, o todo a la vez, son no lineales. Por supuesto, esto hace que las técnicas habituales de la programación

lineal no sean válidas para la resolución de este tipo de problemas y se tenga que recurrir a técnicas bien diferentes.

Los algoritmos de la programación no lineal más robustos y potentes son, según Labadie (2004):

- Programación lineal sucesiva (o secuencial), donde todas las funciones no lineales se aproximan mediante los dos primeros términos de su serie de Taylor asociada. Las soluciones deben mantenerse dentro de una serie de regiones de confianza para evitar inestabilidades en la convergencia.
- Programación cuadrática sucesiva (o secuencial), que aprovecha la eficiencia de la programación cuadrática y la mayor capacidad de los desarrollos cuadráticos para aproximar funciones no lineales que las relaciones lineales.
- Método Lagrangiano aumentado (o método de los multiplicadores), que emplea una función Lagrangiana similar a la empleada en el método anterior pero mejorada con una serie de términos de penalización de forma que el problema de optimización original se puede reemplazar por una secuencia de problemas de optimización no lineal sin restricciones más sencillos de resolver.
- Método generalizado del gradiente reducido. Es una técnica de búsqueda por gradiente restringida que resuelve un problema de optimización reducido respecto a las variables de decisión del problema original.

Todos los algoritmos comentados requieren que tanto la función objetivo como las restricciones del problema sean derivables, aspecto que resulta problemático en la mayor parte de las ocasiones. Aun así, no resulta necesario el cálculo explícito de las derivadas y bastará la utilización de métodos automáticos de derivación. La mayor desventaja de la programación no lineal es la exigencia computacional de los algoritmos, por lo que esta técnica se emplea de forma implícita y apenas se realiza su extensión a la optimización estocástica explícita. Otra desventaja asociada a la programación no lineal es la posibilidad que existe de no alcanzar siempre un óptimo global de la función objetivo, lo que deja a estos métodos en cierta desventaja frente a otros que sí son capaces de evitar los óptimos locales.

Ejemplos de aplicación de programación no lineal son, por ejemplo: Sun (1995), donde se compara el funcionamiento de un paquete de resolución de problemas de programación no-lineal (MINOS) con el de un algoritmo de optimización de redes de flujo generalizadas (EMNET) en el sistema metropolitano de distribución de agua de Californi concluyendo que, pese a que los resultados de la programación no lineal son adecuados, queda en evidencia que sus requerimientos computacionales son muy exigentes; en Barros (2003) se emplea la programación cuadrática sucesiva para la optimización del sistema de generación hidroeléctrica en Brasil y se compara con el funcionamiento de un modelo del mismo sistema resuelto mediante programación

lineal secuencial; en Ghahraman (2004) se resuelve el reparto de recursos entre varios usos agrícolas incluyendo el balance de agua en el suelo mediante programación no lineal y comparando este último con un modelo simplificado resuelto mediante programación lineal.

Otra técnica que puede resolver el problema de las no linealidades en un sistema de recursos hídricos es la programación dinámica. Esta técnica es un método de optimización para resolver procesos de decisión multi-etapa. La característica más atractiva para la aplicación de este tipo de metodologías en la optimización de sistemas de recursos hídricos es que un problema multi-etapa complejo puede descomponerse en una serie de sub-problemas más simples que pueden resolverse de uno en uno de forma recursiva (Dasgupta et al. 2006), basándose en la solución del problema anterior para obtener la solución del siguiente problema.

La programación dinámica puede emplearse tanto de forma determinística como de forma probabilística. Cuando se emplea la metodología determinística, el estado en la siguiente etapa está completamente determinado por el estado y la política de decisión de la etapa actual. La programación dinámica probabilística difiere de la anterior en que el estado de la etapa siguiente no queda completamente determinado por el estado y la decisión de la política en el estado actual. En lugar de ello, existe una distribución de probabilidad para lo que será el estado siguiente. Sin embargo, esta distribución de probabilidad todavía está completamente determinada por el estado y la decisión de la política del estado actual.

Un problema generalizado de la programación dinámica para su aplicación en sistemas multiembalse o con un periodo de cálculo largo viene representado por la gran cantidad de almacenamiento que requiere, problema normalmente referido como problema de la dimensionalidad. Como para obtener todas las posibilidades es necesario almacenar los resultados de los estados anteriores, en problemas grandes la gran cantidad de resultados darán lugar a estructuras de datos muy grandes. Existen métodos que permiten evaluar previamente qué soluciones serán necesarias para llegar al óptimo de forma que se puede liberar espacio desechando las soluciones que no serán utilizadas.

En la literatura científica de los últimos años se encuentran diversos casos de aplicación de la programación dinámica para la obtención de reglas de operación óptimas en embalses. Por ejemplo, Castelleti (2007) combina la programación dinámica con redes neuronales, programación neuro-dinámica para solventar el problema de dimensionalidad comentado en el anterior párrafo y lo aplica a la obtención de nuevas reglas de operación en el sistema del Piave (Italia) que tengan en cuenta los caudales ecológicos. Galelli (2010) emplea la programación dinámica estocástica para encontrar la gestión óptima del sistema del lago Como (Italia).

Todas las técnicas de optimización comentadas hasta el momento son procesos algorítmicos, lo que significa que emplean procesos bien estructurados y convergentes a una solución a cierta información cuantitativa. En contraste a este tipo de técnicas se tienen los métodos heurísticos. Estos métodos están basados en reglas prácticas, experiencia previa, o varias analogías aplicadas a información tanto cuantitativa como cualitativa. Estos métodos no garantizan la obtención de óptimos locales, sino que tratan encontrar soluciones aceptables o satisfactorias. De todas formas, pueden llegar a obtener soluciones óptimas globales a problemas donde los métodos tradicionales fallarían. Con Inteligencia Computacional se hace referencia a un espectro bastante amplio de metodologías bastante diferenciadas, entre ellas se destacan las siguientes:

- *Algoritmos Genéticos (AG)*: Englobados a su vez en lo que se llaman Algoritmos Evolutivos (AE), los AG se basan en los mecanismos de la selección natural y la evolución genética y son, actualmente, el tipo de AE más empleado dentro de la literatura relacionada con la planificación y gestión de sistemas de recursos hídricos (Nicklow 2010). Pese a que no existe una definición universal, los AG se caracterizan por los siguientes elementos: (1) generar una población inicial de soluciones potenciales, cada una identificada como un cromosoma; (2) evaluación de la función objetivo para cada solución y ordenación de los cromosomas según su aptitud; (3) algún proceso de selección de cromosomas, basado en el orden anterior, para participar en un proceso de reproducción, donde se combina la información de dos o más parejas de soluciones “padre” para generar nuevas soluciones “hijo”; y (4) aplicación de algún grado de mutación en las nuevas soluciones para mantener la diversidad y evitar la convergencia prematura a óptimos globales. Como ya resultará evidente, los elementos descritos representan técnicas inspiradas en la biología como la herencia, la mutación, la selección y el cruce, para alcanzar el valor óptimo del problema. Todos los elementos descritos se repiten en generaciones sucesivas hasta que se alcanza una solución adecuada. Lo que se está consiguiendo es que cada nueva generación tenga mejores características que la generación anterior, emulando el proceso biológico de supervivencia del espécimen más adecuado.

Algunos ejemplos de aplicación de AG son: Chen (2006), donde se desarrolla un AG multiobjetivo para optimizar las reglas de gestión de un embalse multipropósito en Taiwán; Ngo (2007), emplea el algoritmo SCE para optimizar las estrategias de control del embalse de Hoa Binh (Vietnam); o un ejemplo más cercano, el proyecto final de carrera de Lerma (2011), en que se comparan diversos algoritmos genéticos y se emplean para obtener unas reglas de gestión óptimas de los embalses de las cuencas de los ríos Júcar y Mijares (España).

- *Redes Neuronales Artificiales (RNA)*: Las RNA, aunque no se clasifican como un método de optimización per se, pueden ser útiles como herramienta de análisis

de regresión múltiple para determinar reglas de operación óptimas a partir de los resultados de métodos de optimización implícita. Las redes neuronales basan funcionamiento en un paralelismo con el cerebro humano y las múltiples interrelaciones de sus neuronas de forma que, una simple neurona puede no realizar un gran trabajo por sí misma, pero muchas neuronas masivamente interconectadas pueden capturar el dinamismo de procesos muy complejos. Se puede encontrar un desarrollo completo de esta técnica en ASCE (2000, I y II), donde se explica el funcionamiento de las RNA así como sus aplicaciones en el campo de los recursos hídricos.

Respecto a la utilización de las RNA en la obtención de políticas de gestión óptima de sistemas de recursos hídricos se encuentran en la literatura numerosos casos en los que esta técnica se utiliza conjuntamente con otras de las ya explicadas. Por ejemplo, en Chaves (2008) se emplean las RNA junto a los AG para encontrar una estrategia de operación óptima de un embalse en Taiwan, de forma que mediante la utilización de un AG se buscan los mejores parámetros de la RNA que posteriormente se utilizará para obtener las sueltas adecuadas a las demandas y otros objetivos de gestión.

- *Lógica Difusa (LD)*: La LD surge como una herramienta para tratar con problemas en los que los parámetros de decisión son inciertos, imprecisos o basados en aspectos cualitativos. En lugar de emplear ecuaciones complejas, la LD emplea descripciones lingüísticas para definir la relación entre los inputs y los outputs. De esta forma, un embalse puede estar lleno o vacío (0 o 1), pero no queda claro cuándo pasa de un estado a otro, podría también decirse que está lleno cuando se encuentra al 90% de su capacidad o casi vacío cuando se encuentra al 10%. Los conjuntos difusos permiten transformar las descripciones lingüísticas en formas numéricas utilizables para realizar la toma de decisiones posterior. Los rudimentos de esta metodología se pueden encontrar actualmente en numerosa bibliografía, siendo Zadeh (1965) el primero en enunciarlos.

En el campo de la ingeniería de recursos hidráulicos la LD se emplea, por ejemplo, como sustituta de las técnicas de regresión para inferir reglas de operación óptimas de embalses (Mousavi 2007), o para determinar las sueltas de un embalse con generación de energía hidroeléctrica en función de las entradas y el estado del embalse (Moeini 2011).

Se ha dejado para el final la técnica de optimización en la que se va a centrar el desarrollo de este estudio. Las redes de flujo son una técnica, menos actual que algunas de las descritas anteriormente dado que sus orígenes datan de los años 60 (Ford y Fulkerson 1962), pero utilizada habitualmente para la optimización de sistemas de recursos hídricos (Sabet 1991 y 1992, Kuczera 1993, Sun 1995, Khaliqzaman 1997, Hsu 2002).

La optimización de redes flujo es una forma de programación lineal que aprovecha la particular distribución de los sistemas de recursos hídricos para emplear algoritmos de optimización muy eficientes. Generalmente, la función objetivo trata de maximizar el flujo o minimizar el coste del mismo a través de la red. Para la resolución de la red de flujo se emplean algoritmos como Out-of-Kilter (Ford y Fulkerson 1962, Bazaraa 1993), Relax-IV (Bersetkas 1994), o Simplex (Ahuja 1993). Al igual que ocurre con la programación lineal, la resolución de una red de flujo exige que las relaciones entre los diferentes elementos del sistema sean lineales. Esto resulta un problema, dado que una gran cantidad de los procesos y relaciones que ocurren en un sistema de recursos hídricos son no lineales, como por ejemplo la evaporación, que depende del volumen embalsado, o los retornos de las demandas, que son proporcionales al volumen suministrado en cada paso de tiempo. Aun así, varios autores (Fredericks 1998) han demostrado que estos aspectos pueden solventarse mediante la resolución iterativa de la red de flujo puramente lineal.

De todas formas, también se han desarrollado algoritmos que resuelven redes con un aspecto más general, en las cuales se permite incluir pérdidas, o ganancias, en arcos y nudos. Resolver este tipo de redes normalmente requiere un mayor esfuerzo computacional, aunque un menor número de pasadas, en comparación con un algoritmo de resolución de redes puras, lo que los hace, generalmente, más rápidos (Sun 1995, Hsu 2002).

Las redes de flujo se han empleado de forma extensiva en la optimización de sistemas de recursos hídricos. Ejemplo de ello es la existencia de herramientas como HEC-PRM (Davis 1991), OPTIGES (Andreu 1992) o MODSIM (Labadie 2000) que permiten la creación esquemática de un sistema y la obtención del óptimo funcionamiento del mismo.

En definitiva, existen pocas áreas del conocimiento en las que, históricamente, se hayan empleado modelos de optimización de forma tan variada como en la optimización de sistemas de recursos hídricos (Labadie, 2004). Así, citando a Andreu (1993): *Así, si somos capaces de encontrar una función objetivo adecuada, las técnicas de optimización pueden proporcionar un marco adecuado para el análisis del sistema en el que ha de efectuarse la toma de decisiones. Este punto –el encontrar una función objetivo- no es en absoluto fácil para algún tipo de problemas, por ejemplo, en temas relacionados con planificación en recursos hidráulicos. Tampoco es fácil representar de una forma completa las complejidades de los sistemas a optimizar. Por tanto, y aunque se hable en términos tales como “óptimo global”, en la mayor parte de los casos reales los resultados de la optimización han de contemplarse como aproximaciones y no como soluciones exactas. De esta forma, la optimización ha de entenderse como una herramienta del análisis más que como un proceso que nos ha de dar la solución definitiva. Será necesaria una buena dosis de buen juicio en la formulación de los problemas pues se ha de sopesar*

la necesidad de una representación suficientemente realista del sistema frente a la de que el modelo de optimización resultante sea tratable. Todo esto obliga a que el que quiera utilizar estas técnicas con éxito aprenda a: 1) Distinguir las características esenciales del sistema que conviene mantener en la representación del mismo; y 2) Escoger las técnicas de optimización que le conducirán a modelos tratables, para lo cual ha de conocer las técnicas existentes y/o adaptarlas a nuevas situaciones.

Pese a esto, aún existe una gran diferencia entre la aplicación teórica de los métodos de optimización y su aplicación práctica en el día a día de la gestión de sistemas de recursos hídricos. Labadie (2004) apunta diversas causas entre las que se pueden remarcar las siguientes: (1) el escepticismo de muchos operadores frente a los resultados de los modelos, confiando más en su experiencia personal; (2) las limitaciones tanto computacionales (ya solventadas por lo general hoy en día), como en cuanto al detalle (o falta de él) de los modelos, hace que los resultados no sean tan adecuados como los operadores están dispuestos a aceptar; (3) los modelos de optimización son mucho más exigentes matemáticamente, lo que los hace más difíciles de comprender que los modelos de simulación; (4) muchos modelos de optimización no pueden incorporar el riesgo o la incertidumbre; (5) existe una gran cantidad de modelos entre los que elegir y, muchas veces, resulta difícil, e incluso confuso, escoger uno para cada aplicación en particular; y (6) algunos de los métodos descritos no pueden generalizarse y, por lo tanto, requerirán una formulación particular para cada caso que se desee estudiar.

La inclusión de algunos modelos de optimización generalizables, como es el caso de las redes de flujo, en sistemas de soporte a la decisión ayuda a que se “pierda el miedo” a emplear la optimización como método para determinar reglas de operación tanto en sistemas grandes como en embalses individuales. Aun así, sigue siendo necesario mejorar, más que la eficiencia de resolución, la representatividad/detalle de los modelos, así como su generalización de forma que no sea necesario realizar una formulación particular para cada caso. De hecho, es necesario encontrar el equilibrio entre representatividad y generalización dado que, si la representatividad deseada es muy pormenorizada, no quedará más remedio que elaborar una formulación particular del problema resolver.

2. El problema de asignación de recursos hídricos y las redes de flujo. El modelo OPTIGES.

Como ya se ha comentado en la introducción, el problema de asignación de recursos hídricos, o “water allocation problem”, consiste en obtener los repartos de flujos en una determinada cuenca hidrográfica de forma que los diferentes usos del agua queden satisfechos de la mejor manera posible. Es una forma distinta a decir que se desea obtener una distribución óptima del agua dentro de la cuenca.

Se ha considerado que la mejor forma de mostrar el problema que se está tratando es mediante un ejemplo. En la figura 2.1 se muestra un ejemplo de sistema de recursos hídricos sencillo en el que existen un embalse, dos demandas, una urbana y otra agrícola, unidos todos entre sí por una serie de tramos de río o canales en cuyo tramo final existe un requerimiento de caudal debido a causas medioambientales.

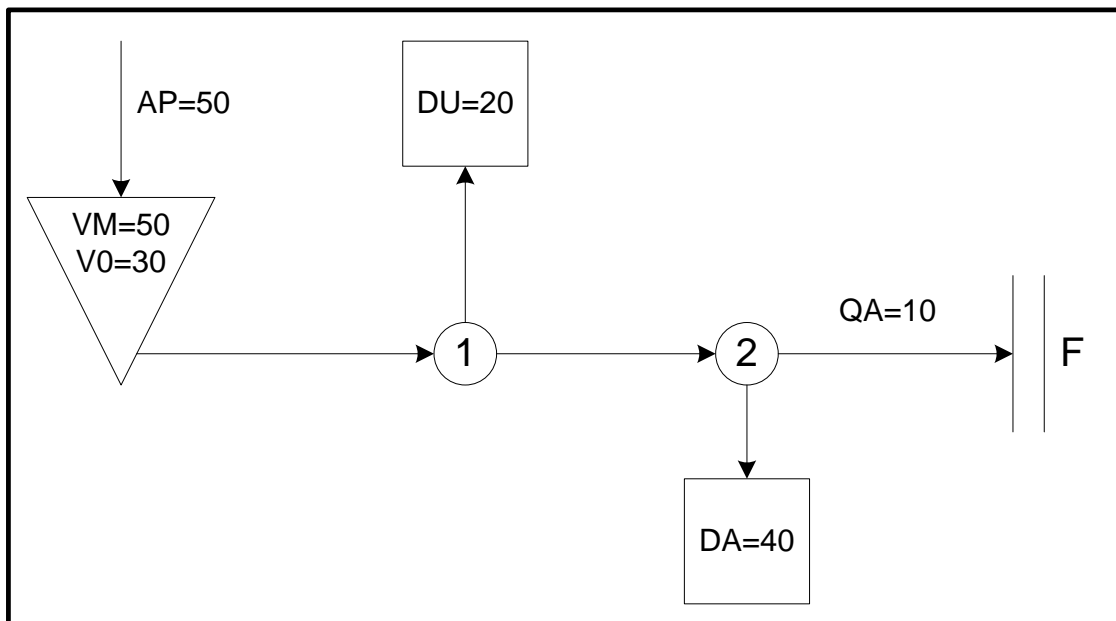


Figura 2.1 Ejemplo de sistema de recursos hídricos

Se observa en la figura que los recursos disponibles, entre aportación y volumen almacenado en el embalse a principio de mes, es de 80 unidades, mientras que la demanda de recursos por parte de los diferentes usos en la cuenca es de 80 unidades también. En este caso no existe mayor problema dado que la cantidad de recurso disponible y la cantidad demanda es la misma y no existe en la cuenca ninguna otra limitación.

Planteemos a continuación el caso en que la aportación al sistema de la figura 2.1 fuera diez unidades menor, esto es 40 unidades, sin modificar los requerimientos. Se daría la situación de no poderse suministrar agua a todos los usos y requerimientos. Es en

situaciones como en la presente que se hace necesario definir un modelo que nos permita optimizar el reparto de flujos entre todos los usos del agua en el sistema.

Por ejemplo, se podría plantear el objetivo de maximizar el suministro a las distintas demandas al tiempo que se trata de mantener el embalse lo más lleno posible de cara a futuras necesidades. Así se podría plantear la siguiente función objetivo:

$$\text{Max } a \cdot SDA + b \cdot SDU + c \cdot V$$

Donde SDA es el suministro a la demanda agrícola, SDU es el suministro a la demanda urbana y V es el volumen de agua almacenado en el embalse. Las variables a, b y c representan el beneficio que supone que una unidad de agua sea asignada a un determinado uso, y en base al valor que tome cada una de ellas se realizará un reparto del recurso u otro de forma que el valor de la función objetivo sea el máximo posible.

Las restricciones que se presentan en el sistema representado en la figura 2.1 serían:

$$V \leq 50$$
$$Q_{2-F} \geq 10$$

Que vienen a significar que el volumen almacenado no puede exceder la capacidad del embalse y que el caudal a través del último tramo debe ser, al menos, el impuesto en la restricción. La restricción de caudal ecológico podría introducirse también como parte de la función objetivo, asignándole un beneficio, pero se ha optado, en este ejemplo, plantearla como una restricción.

Por supuesto, un ejemplo tan sencillo como el expuesto tiene una resolución muy sencilla que ni siquiera requeriría la utilización de un algoritmo de resolución. No resultará tan evidente cuando se trate de esquemas mucho más complejos con más elementos y restricciones, o simplemente el periodo de cálculo se extienda durante mucho tiempo. Será frente a esos casos, en los que la solución óptima no es inmediata e incluso pueden existir múltiples posibilidades, cuando el gestor del agua deberá emplear técnicas de optimización avanzadas que le permitan llevar a cabo su análisis.

El esquema de la figura 2.1 puede representarse mediante una red de flujo compuesta por arcos y nudos como la que se muestra en la figura 2.2. Los nudos representan puntos de confluencia o divergencia del sistema, y los arcos representan las salidas de los embalses, los flujos a través de las conducciones, el almacenamiento, la evaporación, etc. Cada arco está definido por el nudo de origen, el nudo final, los límites superior e inferior del flujo que puede circular por el mismo y el coste asociado a la circulación de dicho flujo. El nudo de balance representa que la red es conservativa, al igual que el sistema, ya que en última instancia el balance de materia debe mantenerse y, por tanto, los flujos de entrada deben coincidir con los flujos de salida.

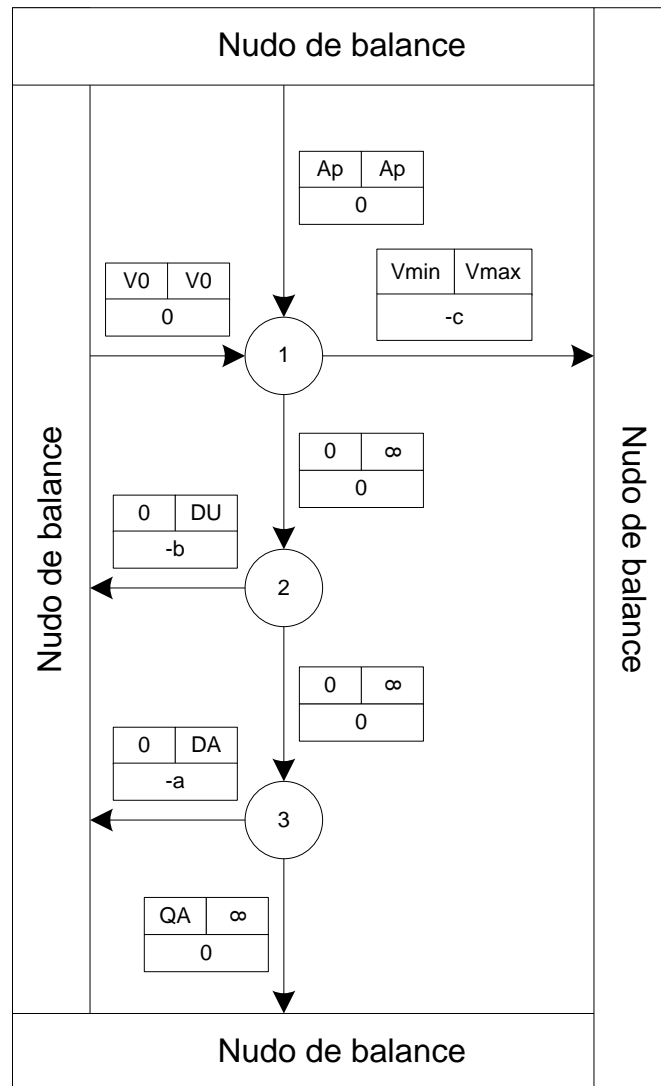


Figura 2.2. Representación del esquema de recursos hídricos en la figura 2.1 en forma de red de flujo

El empleo de la metodología de redes de flujo para la resolución de problemas como el presente resulta evidente ya que la similitud entre ellos es más que tangible. Obviamente, en casos tan sencillos como el presentado en el ejemplo no sería necesaria ni una calculadora para llevar a cabo la resolución del reparto óptimo de flujos. La dificultad de los problemas incrementa por dos causas fundamentalmente, el tamaño del sistema y el horizonte de cálculo. La figura 2.3 muestra el desarrollo del sistema representado en la figura 2.2 en forma de grafo multiperiodo cuya resolución daría como resultado el reparto óptimo de los flujos durante los n meses representados en el mismo¹.

¹ Entiéndase que el grafo mostrado en la figura 2.2 representa un periodo de optimización de un mes

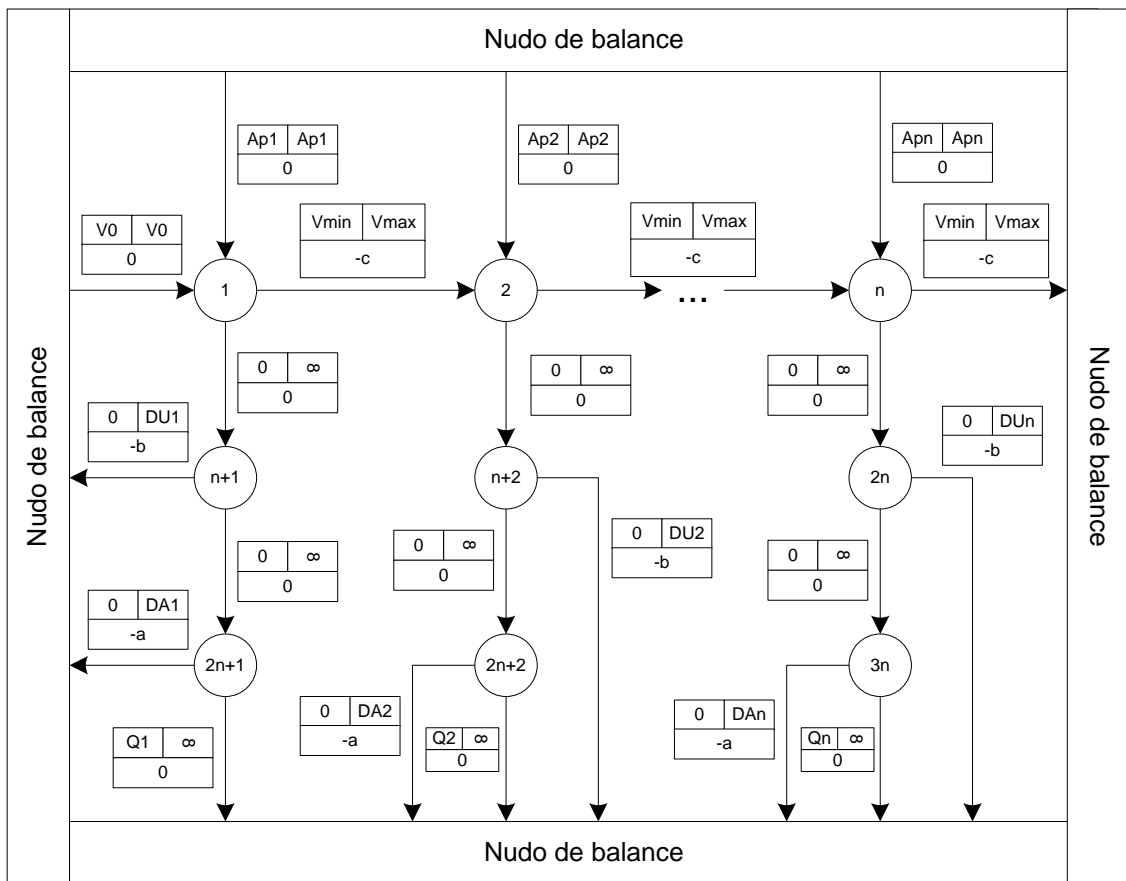


Figura 2.3. Grafo multiperíodo del sistema de recursos representado en la figura 2.1

Cuando el ejercicio de resolver la optimización de un esquema de recursos hídricos no resulte baladí y resulte necesaria la consideración de múltiples elementos durante un horizonte de cálculo considerable, será de gran ayuda contar con alguna herramienta que nos permita desarrollar el modelo del sistema que deseamos estudiar y se encargue, internamente, de generar la red de flujo, ejecutar el algoritmo que la resuelva y, finalmente, mostrarnos los resultados en un formato que nos permita trabajar posteriormente con ellos para su análisis.

Dada la gran similitud entre un esquema de un sistema de recursos hídricos y una red de flujo y la sencillez de la formulación del problema de flujo a coste mínimo, permite emplear el método en prácticamente cualquier sistema de recursos hídricos que se desee modelar. Por estas razones se han creado muchas herramientas para la creación de modelos, tanto de simulación como de optimización, de sistemas de recursos hídricos cuyo motor de cálculo es un algoritmo de resolución de redes de flujo.

Así, dentro de los modelos de simulación, encontramos los ejemplos de MODSIM (Labadie 2000) y de SIMGES (Andreu et al. 2007), que emplean los algoritmos Relax-IV y Out-of-Kilter respectivamente para realizar el reparto de flujos a escala mensual a lo largo del sistema. Para conseguir que la simulación sea lo más fiel a la realidad, ambos modelos incluyen la posibilidad de definir prioridades entre los diferentes usos del agua,

así como reglas de operación de embalses, siendo el segundo de ellos el que más desarrollado tiene este segundo aspecto. Si bien gracias a los aspectos comentados, los resultados de ambos modelos responden a una simulación del sistema, éstos no dejan de ser modelos de optimización a escala mensual ya que todos los algoritmos de resolución de redes de flujo terminan arrojando un vector de flujos que es el óptimo para la red planteada.

Respecto a los modelos de optimización propiamente dichos, u optimización multiperiodo dado que se optimizan periodos superiores al mes, que emplean algoritmos de resolución de redes de flujo, se tienen los modelos HEC-PRM (Davis 1991) y OPTIGES (Andreu 1992). El primero de ellos emplea una implementación del algoritmo de resolución de redes de flujo generalizadas enunciado por Jensen, mientras que el segundo utiliza el algoritmo Out-of-Kilter para redes de flujo puras.

Referencias

- Ahuja R, Magnanti T, Orlin J (1993) Network Flows: theory, algorithms and applications. Prentice Hall, New York
- Andreu J (1992) Modelo OPTIGES de Optimización de la Gestión de Esquemas de Recursos Hídricos. Manual del programador. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia
- Andreu J (1992) Modelo OPTIGES de Optimización de la Gestión de Esquemas de Recursos Hídricos. Manual del usuario. Versión 2.0. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia
- Barros M, Tsai F, Yang SL, Lopes J (2003). Optimization of large-scale hydropower system operations. J Water Resour Plan Manag 129, 178-188
- Bazaraa M, Jarvis J (1977) Linear Programming and Network Flows. John Wiley and Sons Inc, New York
- Bersetkas D (1985) A unified framework for primal-dual methods in minimum cost network flows problems. Math Program 32, 125-145
- Bersetkas D, Tseng P (1988) The relax codes for linear minimum cost network flow problems. Ann of Oper Res 13, 125-190
- Bersetkas D, Tseng P (1994) RELAX-IV: A Faster Version of the RELAX Code for Solving Minimum Cost Flow Problems. Completion Report under NSF Grant CCR-9103804. Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, MIT, Boston
- Castelleti A, de Rigo D, Rizzoli AE (2007). Neuro-dynamic programming for designing water reservoir network management policies. Control Eng Pract 15, 1031-1038
- Celeste, A., Billib, M. (2009) Evaluation of stochastic reservoir operation optimization models. Adv Water Resour 32, 1429-1443
- Celeste A, Billib M (2010) The Role of Spill and Evaporation in Reservoir Optimization Models. Water Resour Manag 24, 617-628
- Chaves P, Chang FJ (2008) Intelligent reservoir operation system based on evolving artificial neural networks. Adv Water Resour 31, 926-936
- Chou F, Wu C, Lin C (2006) Simulating Multi-Reservoir Operation Rules by Network Flow Model. ASCE Conf. Proc. 212, 33
- Chung F, Archer M, DeVries J (1989) Network Flow Algorithm Applied to California Aqueduct Simulation. J Water Resour Plan Manag 115, 131-147
- Curet N (1994) An incremental primal-dual method for generalized networks. Comp Oper Res 21, 1051-1059
- Curet (1997) Applying steepest-edge techniques to a network primal-dual algorithm. Comp Oper Res 24, 601-609
- Curet N (1998) Implementation of a steepest-edge primal-dual simplex method for network linear programs. Ann Oper Res 81, 251-270
- Dasgupta S, Papadimitriou C, Vazirani U (2006). Algorithms. McGraw-Hill

- Deka PC, Chandramouli V (2009) Fuzzy Neural Network Modeling of Reservoir Operation. *J Water Resour Plan Manag* 135, 5-12
- Devi S, Srivastava DK, Mohan C (2005) Optimal Water Allocation for the Transboundary Subernarekha River, India. *J Water Resour Plan Manag* 131, 253-269
- Ford L, Fulkerson D (1962) *Flows in networks*. Princeton University Press, Princeton
- Fredericks J, Labadie J, Altenhofen J (1998) Decision Support System for conjunctive Stream-Aquifer Management. *J Water Resour Plan Manag* 124, 69-78
- Galelli S, Soncini-Sessa R (2010) Combining metamodelling and stochastic dynamic programming for the design of reservoir release policies. *Environ Model Softw* 25, 209-222
- Ghahraman B, Sepaskhah AR (2004). Linear and non-linear optimization models for allocation of a limited water supply. *Irrig and Drain* 53, 39-54
- Hinçal O, Altan-Sakarya AB, Ger AM (2011) Optimization of Multireservoir Systems by Genetic Algorithm. *Water Resour Manag* 25, 1465-1487
- Ilich N (2009) Limitations of Network Flow algorithms in River Basin Modeling. *J Water Resour Plan Manag* 135, 48-55
- Kennington JL, Helgason RV (1980) *Algorithms for Network Programming*. John Wiley and Sons, New York
- Khaliqzaman, Chander S (1997) Network Flow Programming Model for Multireservoir Sizing. *J Water Resour Plan Manag* 123, 15-21
- Klingman D, Napier A, Stutz J (1974) NETGEN – A program for Generating Large Scale (Un) Capacitated Assignment, Transportation, and Minimum Cost Flow Problems. *Manag Sci* 20, 814-822
- Kuczera G (1993) Network Linear Programming Codes for Water-Supply Headworks Modeling. *J Water Resour Plan Manag* 119, 412-417
- Labadie J, Baldo M, Larson R (2000) MODSIM: Decision support system for river basin management. Documentation and user manual. Dept. Of Civil Engineering, CSU, Fort Collins
- Labadie J (2004) Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review. *J Water Resour Plan Manag* 130, 93-111.
- Lévitte H, Sally H, Cour J (2003) Testing water demand management scenarios in a water-stressed basin in south Africa: application of the WEAP model. *Phys Chem Earth* 28, 779-786
- Loucks, D. (1992) Water Resource System Models: Their Role in Planning. *J Water Resour Plan Manag* 118, 214-223.
- MMA (2008). Confederación Hidrográfica del Duero. Memoria 2008.
<http://www.chduero.es/Inicio/Publicaciones/tabid/159/Default.aspx>. Last accessed 09 March 2011
- Moeini R, Afshar A, Afshar MH (2011) Fuzzy rule-based model for hydropower reservoirs operation. *Electr Power Energy Syst* 33, 171-178
- Mousavi SJ, Ponnambalam K, Karray F (2007) Inferring operating rules for reservoir operations using fuzzy regression and ANFIS. *Fuzzy Set Syst* 158, 1064-1082

- Nicklow J et al (2010) State of the Art for Genetic Algorithms and Beyond in Water Resources Planning and Management. *J Water Resour Plan Manag* 136, 412-432
- Rani D, Moreira M (2010) Simulation-Optimization Modeling: A Survey and Potential Application in Reservoir Systems Operation. *Water Resour Manag* 24, 1107-1138
- Sabet H, Creel C (1994) Network Flow Modeling of Oroville Complex. *J Water Resour Plan Manag* 117, 301-320
- Sechi G, Zuddas P. (2008) Multiperiod Hypergraph Models for Water Systems Optimization. *Water Resour Manag* 22, 307-320
- Sun YH, Yeh W, Hsu NS, Louie P (1995) Generalized Network Algorithm for Water-Supply-System Optimization. *J Water Resour Plan Manag* 121, 392-398
- Wurbs R (1993) Reservoir-System Simulation and Optimization Models. *J Water Resour Plan Manag* 119, 455-472
- Wurbs R (2005) Modeling river/reservoir system management, water allocation, and supply reliability. *J Hydrol* 300, 100-113
- Yamout G, El-Fadel M (2005) An Optimization Approach for Multi-Sectoral Water Supply Management in the Greater Beirut Area. *Water Resour Manag* 19, 791-812
- Yates D, Sieber J, Purkey D, Hubert-Lee A (2005) WEAP21 – A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model. Part 1: Model Characteristics. *Water Int* 30, 487-500