



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



# AQUATOOL

---

## AQUATOOL 2021

Versión 2.0 GeoAquatool

HERRAMIENTAS PARA EL CÁLCULO  
DE LA SIMULACIÓN Y  
OPTIMIZACIÓN DE LA GESTIÓN  
CONJUNTA DE SISTEMAS DE  
RECURSOS HÍDRICOS CON TIEMPO  
en PASO VARIABLE.

---

## MANUAL TÉCNICO

---

Equipo [Aquatool](#).

Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos

[IIAMA](#)

[UPV](#)

Última edición: mayo de 2023

---

## Contenido

1. Definición de un modelo de cálculo.....	2
2. Tipos y definición de los elementos considerados.....	3
2.1. Nudos.....	3
2.2. Conducciones.....	3
2.3. Aportaciones superficiales y subterráneas.....	5
2.4. Embalses.....	5
2.5. Demandas de uso consuntivo.....	8
2.6. Usos hidroeléctricos.....	12
2.7. Acuíferos.....	13
2.8. Indicadores y reglas de gestión.....	22
3. Optimización de la gestión del sistema.....	27
3.1. Función objetivo y optimización.....	27
3.2. Proceso iterativo.....	35
4. Resultados.....	37
4.1. Series de resultados de la simulación u optimización de la gestión en la escala de cálculo.....	38
4.2. Series de resultados resumen en escala mensual y anual.....	41
4.3. Resumen de resultados y garantías.....	42

Este documento tiene la finalidad de proporcionar una descripción detallada del manejo de los programas para servir de ayuda en la preparación de los datos para el modelo y la comprensión de los resultados. Contiene la explicación de los elementos comunes a todos los modelos de simulación de la gestión de sistemas que forman parte de AQUATOOL 2021 versión 2.00 para GEOAQUATOOL, (AQT\_SIM, AQT-OPT y AQT-RISK).

Todos tienen en común la base de datos y los principales algoritmos de cálculo para resolver el reparto del agua en todo el sistema para obtener la gestión óptima del recurso, a su vez, se diferencian entre sí en: la parametrización de los procesos comunes, el uso de algunos algoritmos particulares y el uso que se hace de algunos elementos que conforman el modelo. Todo ello da como resultado distribuciones del agua similares, pero con ciertas diferencias que hacen que la utilidad prestada por cada modelo sea diferente. Será responsabilidad del usuario la selección del programa de cálculo más adecuado al problema que analiza.

AQUATOOL 2021 tiene como principal diferencia con respecto a los módulos de simulación y optimización de la gestión de cuencas clásicos (SIMGES Y OPTIGES) que permite bajar la escala de tiempo de paso mensual a intervalos inferiores. Es por ello que en la redacción de este documento se asume que el lector conoce cómo funcionan dichos programas. Los nuevos programas, aunque siguen la misma filosofía que los anteriores en su diseño, han sido desarrollados completamente nuevos incluyendo mejoras en el diseño de la función objetivo y del proceso iterativo, así como la inclusión de nuevos procesos apropiados para una escala de tiempo más corta que el mes. Esto implica que si se realiza una simulación mensual con estos modelos, los resultados no necesariamente serán iguales a los de los antiguos modelos de paso mensual.

## 1. Definición de un modelo de cálculo.

La configuración de un modelo de cálculo para Aquatool2021 se realiza mediante la cumplimentación de una base de datos formada por un conjunto de tablas almacenadas en formato CSV separado por comas. Estas tablas son completadas automáticamente por la interface gráfica AQUATOOLGEO.

Si se dispone de un modelo desarrollado anteriormente para AQUATOOL+, este puede ser adaptado automáticamente mediante la misma interface gráfica. Sin embargo, si se utiliza otra escala temporal de cálculo, algunos parámetros deberán ser redefinidos por el usuario.

En esta base de datos se encuentra definida la siguiente información:

1. Esquema de flujo, conectividad del modelo. Esto se realiza mediante la interface gráfica trazando los elementos puntuales de interés (nudos, embalses, demandas, etc.) junto a las conexiones entre ellos (conducción o tramos de río, tomas y otros).
2. Datos característicos de cada elemento: dimensionamiento de infraestructuras y cuantía de demandas principalmente.
3. Series temporales de datos de recursos y otros.

Con esta definición física del modelo ya se puede proceder a la simulación de la gestión con los módulos de AQUATOOL2021

## 2. Tipos y definición de los elementos considerados.

A continuación, se describen los distintos elementos considerados para su posible inclusión en el esquema de la cuenca. Al mismo tiempo se definen los datos necesarios para su definición física, así como la participación del elemento en la gestión del sistema y los parámetros de gestión necesarios para definirla más concretamente.

### 2.1. Nudos.

Los nudos no son considerados como elementos propiamente dichos, ya que su única finalidad es la de servir de puntos de unión en la delimitación del flujo de agua en la cuenca. El concepto de nudo se corresponde con el de un punto de conexión entre otros elementos. Por ejemplo:

- Confluencia entre distintos tramos de río o conducciones.
- Punto de incorporación de aportaciones u otros flujos como: retorno de demanda, o bombeo de acuífero.
- Punto de salida para suministro a demandas, a usos hidroeléctricos o recarga de acuíferos.
- Un punto de cambio en las características de un río o de una conducción.

Los nudos han de ser identificados con un número o código de elemento único que los distingue del resto.

Obligatoriamente se definirá un nudo al cual irán a parar todos los flujos que salgan del sistema y al que se asignará el número de usuario [NumUser=0]. Puede haber varios nudos de salida del sistema.

### 2.2. Conducciones.

Las conducciones representan en general tramos de río o canales artificiales, y se definen mediante la identificación de los nudos inicial y final que conectan. Las conexiones o conducciones son siempre orientadas, es decir, que el agua fluye por ellas siempre en un sentido, desde el nudo inicial al nudo final.

En las conducciones se puede definir opcionalmente otras propiedades, como:

- Caudal mínimo requerido. Definido como uno o más valores temporales o una serie de datos para todo el periodo simulado. El caudal mínimo es priorizado para ser satisfecho incluso antes que las demandas de consumo, aunque puede ser vulnerado.
- Caudal máximo de la conducción, que se define con uno o más valores temporales o una serie de datos para todo el periodo simulado. Este caudal máximo constituye una limitación física y no puede ser vulnerado. En la simulación de la gestión el modelo no violará nunca los caudales máximos, de forma que es necesario tener especial cuidado si se define algún caudal máximo para conducciones que sean naturales (tramos de río), pues si éste es reducido puede dar lugar a que físicamente sea imposible el respetar el caudal máximo, pudiendo producir un error fatal en la ejecución del modelo.
- Caudal máximo admisible en crecidas. Se define como un solo dato de caudal máximo. Este caudal sí puede ser superado, pero a un alto coste en la función a optimizar. La finalidad de este dato es la simulación del control de crecidas en ríos. Aunque este máximo es admitido en la simulación (AQT-SIM), es con la optimización (AQT-OPT) donde puede prestar mayor utilidad para el análisis de medidas de anticipación frente al control de crecidas.
- Asignación de un coste del flujo arbitrario o "coste de usuario" que permite utilizar la conducción como elemento auxiliar en la definición de fórmulas de gestión arbitrarias o reglas de operación.
- Filtraciones dependientes del caudal de entrada a la conducción. Se considera que las pérdidas, (P), son función del caudal de entrada (Q). El cálculo se realiza en términos de volumen ( m<sup>3</sup>/pasotiempo) con la siguiente ley:

$$P=a+b Q^c$$

*Ecuación 1: Expresión general para el cálculo de filtraciones en una conducción.*

Siendo **a**, **b** y **c** parámetros suministrados por el usuario y requeridos por el modelo. Las filtraciones pueden incorporarse a un acuífero o salir del sistema. Los datos suministrados por el usuario deben tendrá unidades de **a** [m<sup>3</sup>/día], **b** y **c** adimensionales. El programa corregirá los parámetros para aplicar la ecuación en las unidades adecuadas al paso de tiempo de cálculo.

$$P_p = a * d_p + b \cdot Q^c$$

*Ecuación 2: Expresión utilizada para el cálculo de filtraciones en una conducción.*

Siendo  $d_p$  el número de días que alcanza cada paso de la simulación. Si se considera el paso de tiempo definido como fracciones del año, un día se considera como 1/360 años.

- Conducción conectada hidráulicamente con acuífero. Es aquella conducción cuyo lecho atraviesa un acuífero existiendo conexión hidráulica entre los dos, y por tanto la posibilidad tanto de filtraciones de lecho hacia el acuífero como drenaje del acuífero hacia el río, dependiendo de la situación de niveles piezométricos del acuífero. Será por tanto necesario definir qué acuífero es el que está conectado con la conducción, e identificar, de entre las respuestas de simulación del acuífero (parámetros de control) cual es aquella que cuantifica el flujo entre los dos.

### 2.3. Aportaciones superficiales y subterráneas.

Se considera como aportaciones los flujos de agua que se incorporan al sistema. Las aportaciones se asignan a un nudo de la red.

Estas pueden ser aportaciones superficiales y se incorporan a un elemento tipo nudo o embalse. O pueden ser recargas en acuíferos con lo que se incorporan a un elemento tipo acuífero y requieren también la definición de la manera en que se incorpora al acuífero "acción elemental".

El usuario debe de proporcionar las series temporales de aportaciones en  $m^3/s$  promedio diario. Se permite la asignación de datos temporales de aportaciones en 4 niveles de detalle: un único valor fijo, 12 valores promedio mensuales, un año promedio en la escala de cálculo o una serie completa de datos para cada paso del periodo de simulación.

### 2.4. Embalses.

Los embalses superficiales corresponden a puntos del esquema en los que existe capacidad de almacenamiento de agua. Son elementos básicos de la gestión. La simulación se efectúa simplemente por balance de masas, con lo que el volumen a final de cada paso de tiempo  $V_f$ , se obtiene como:

$$V_f = V_i + A - P_f - E - S_c - S_v$$
$$0 < V_f < C$$

---

*Ecuación 3: Cálculo del balance en embalses.*

donde:

- $V_i$  es el volumen a principio del paso de tiempo,
- $A_a$  son las aportaciones de la parte del esquema aguas arriba del embalse,
- $P_f$  son las pérdidas por filtración,
- $E$  son las pérdidas por evaporación,
- $S_c$  son las sueltas controladas, o sea aquellas que no sobrepasan la capacidad de desagüe del embalse, incluidas tomas dentro del vaso,
- $S_v$  son los vertidos, o sea los desembalses producidos por superarse la capacidad máxima, y no caber por los dispositivos de desagüe controlables,
- $C$  capacidad del embalse.

#### 2.4.1. Definición mínima de un embalse.

El embalse se define por dos datos de **capacidad** y **embalse muerto**.

Se entiende por capacidad la correspondiente al nivel máximo normal o de crecidas (según criterio de diseño). No confundir con los máximos que establecen las normas de explotación de la presa, que pueden definirse bajo el concepto de "volumen máximo".

El embalse muerto puede ser 0 y se correspondería con el volumen de agua inaccesible que queda por debajo de la cota del desagüe de fondo. El "embalse muerto" será inaccesible para la gestión, aunque sí puede disminuir por filtraciones y evaporación.

El resto de los datos que se describen a continuación son opcionales.

#### 2.4.2. Filtraciones en embalse.

Para el cálculo de las pérdidas por filtración se considera una ley del tipo:

$$P_f = a + b V^c$$

*Ecuación 4: Cálculo de filtraciones en embalse.*

Donde:

- $P$  y  $V$  son las pérdidas y volumen instantáneos,
- y  $a$ ,  $b$  y  $c$  son parámetros suministrados por el usuario y requeridos por el modelo. Las pérdidas totales en un paso de tiempo se obtienen a partir del volumen promedio entre el valor inicial y final del paso de tiempo. Como en el caso de conducciones:  $a$  [ $m^3/día$ ],  $b$  [%/día] y  $c$

[adimensional]. Para simulaciones a una escala de tiempo diferente del día, el programa multiplica por el número de días [ $d_p$ ] los parámetros  $a$  y  $b$  dejando invariable  $c$ .

$$P_f = a * 10 * d_p + (b * d_p) \cdot V^c$$

*Ecuación 5: Expresión utilizada para el cálculo de filtraciones en un embalse.*

Donde  $V$  es el volumen embalsado en  $\text{hm}^3$ ,  $a \cdot 10^{-6}$  el valor de  $a$  en  $\text{hm}^3$ ;  $d_p$  la longitud del paso de tiempo en días.

### 2.4.3. Evaporación de embalse.

Para el cálculo de las pérdidas por evaporación se aplica la fórmula:

$$E = \frac{S_f + S_i}{2} e * 10^{-5} * d_p$$

*Ecuación 6: Cálculo de la evaporación en embalses.*

donde  $S_f$  y  $S_i$  son las superficies, en ha, de la lámina de embalse correspondientes al volumen final e inicial, respectivamente,  $e$  es el dato de tasa de evaporación en [mm/día] y  $d_p$  el número de días de cada paso de tiempo. En esta expresión  $E$  se obtiene en  $\text{hm}^3$

### 2.4.4. Gestión del embalse.

Se puede definir las normas de gestión del embalse mediante una serie de valores de **volumen máximo de gestión** y **embalse mínimo**. Adicionalmente, también se puede escalar diferentes **volúmenes objetivo** en el embalse para regular una gestión conjunta de embalses más detallada.

Para la gestión de los embalses de la cuenca se puede definir, como en SIMGES, curvas de volumen máximo, objetivo y mínimo. En estas condiciones la gestión se realiza de forma que se mantengan todos ellos en la medida de lo posible dentro de una misma zona de llenado. Para la definición de las zonas de llenado se permite la definición por parte del usuario de uno o varios "Volúmenes objetivo",  $V_{obj}$ , de tal forma que cada curva divide el embalse en dos zonas que tendrán una prioridad de almacenamiento diferente. Si se tiene varios embalses con diferente número de zonas de gestión, se entiende que las nuevas zonas quedarán por debajo de las anteriores con una prioridad de almacenamiento superior.

También se define un "número de prioridad de almacenamiento" en embalse,  $N_p$ , para cada embalse. De esta forma, el modelo no utilizará agua de la zona intermedia de un embalse hasta que no haya agotado el agua de la zona superior de todos los demás. Y entre dos

embalses en la misma zona tomará agua primero de aquel que tenga el valor del número de prioridad de almacenamiento más alto.

Se permite la definición de un caudal máximo de **sueatas controladas**  $S_c$  mediante el cual solo se podrá desembalsar volúmenes inferiores a  $S_c$ , excepto cuando el embalse ha alcanzado su volumen máximo de gestión en que se considera que puede desembalsar todo lo necesario a través del aliviadero. En esta situación el modelo presenta dos resultados de suelta del embalse:  $S_c$  y vertido ( $S_v$ ).

#### 2.4.5. Elementos de tipo captación en embalse.

Además de los criterios descritos se permite la definición de un elemento específico de toma de agua en embalse.

Este elemento se define como una conexión entre un embalse y un nudo. Y se define por una cota mínima de toma y la capacidad máxima de desagüe dependiente de la cota de agua en el embalse. La simulación limita su capacidad por una función de la cota de embalse relativa a la cota de toma. El proceso iterativo recalcula en cada paso de tiempo su capacidad según la cota promedio del embalse entre el inicio y fin del paso de tiempo según la ecuación siguiente.

$$V_{max} = a \cdot (\Delta h)^b \cdot 0.0864 \cdot t$$

Donde

$V_{max}$  es el volumen máximo que puede suministrar en cada paso de tiempo (medido en  $hm^3$ )

$a$  y  $b$  son parámetros dados,  $a$  vendría dado en  $[m^3/s/m]$ ,

$t$  es el número de días en cada paso de tiempo (0.0864 es el número de s/día).

$\Delta h$  en metros, es la diferencia de cota entra la cota base de la toma y la cota en el embalse calculada como promedio entre la cota inicial y final del embalse en el paso de la simulación.

#### 2.5. Demandas de uso consuntivo.

Se define las demandas como elementos que utilizan el agua de forma que parte de ella es consumida y no retorna al sistema. Con esta definición permite la representación de usos urbanos, industriales y agrícolas.

La demanda puede definirse mediante varios elementos:

- Elemento demanda consuntiva.
- Elementos toma superficial. Y/o elementos bombeo
- Elemento retorno.

### 2.5.1. Elemento demanda consuntiva.

El elemento demanda es el único necesario para la modelación de demandas. En este se define los valores de demanda correspondiente, la cual puede definirse como un año promedio o mediante una serie temporal.

La demanda puede conectarse al sistema mediante una o varias tomas conectadas a un nudo; o mediante bombeo de un acuífero. También se conecta mediante un retorno al sistema que puede ser un elemento de tipo "retorno superficial" o como recarga a un acuífero.

La demanda puede definirse como demanda genérica o calificarse como demanda urbana o demanda agrícola, lo que permitirá la definición más cuidadosa de algunas propiedades propias de tal tipo de demanda.

A efectos de determinar el volumen de agua de retorno se define en dos partes:

En la toma superficial se define un coeficiente de retorno superficial,  $\alpha$ , que se aplica al suministro a través de esta toma. Con ello, el agua que vuelve al sistema en forma de retorno superficial es:

$$R = \alpha \times S_{sup}$$

siendo  $S_{sup}$  el suministro superficial de la toma. Y  $R$  el retorno que se enviará al elemento de retorno asignado.

En la demanda se define también un coeficiente de consumo,  $\beta$ . El cual se aplica sobre la dotación bruta de la demanda. Con ello, el retorno subterráneo viene dado por:

$$I = (1 - \alpha - \beta) \times S_{sup}$$

Siendo  $S_{sup}$  el suministro por cada una de las tomas superficiales. Mientras que para el suministro que procede de bombeo directo, el retorno se calcula como:

$$I = (1 - \beta) \times S_{sub}$$

Siendo  $S_{\text{sub}}$  el suministro subterráneo.

### ***Demanda urbana.***

Si se designa un elemento como demanda urbana, esto hará que el programa le asigne en la red de flujo una prioridad de suministro superior al cumplimiento de caudales ambientales.

### ***Demanda agrícola.***

La definición de una demanda como agrícola tiene varios efectos en su diseño:

- Para permitir un tratamiento más detallado del balance en demandas agrarias se puede aportar datos de demanda neta en el cultivo. Esta puede también definirse como un año medio o con una serie temporal. En este caso, se calculará la demanda de riego como

$$D_r = D_n / ef_r$$

Donde:

$D_n$  es la demanda neta

$ef_r$  es la eficiencia en el riego

El retorno subterráneo se obtiene como  $D_r - D_n$

Y la demanda bruta se puede obtener de la misma forma con la eficiencia en la distribución y transporte

$$D_b = D_r / ef_t$$

El retorno superficial se calcula como  $D_b - D_r$

Si también se incluye datos de demanda bruta, estos se entenderán como la asignación, y se limitará el suministro a esta demanda bruta, ajustando los retornos para mantener el balance. En caso contrario, la demanda bruta se calcula a partir de la demanda neta por los parámetros indicados.

- Como consecuencia de lo anterior, en este caso las ecuaciones de retorno superficial y subterráneo se cambian para sustituir los parámetros de % de retorno por parámetros de eficiencia en la distribución (en elementos tipo toma) y eficiencia en la aplicación (en los elementos tipo demanda).

### 2.5.2. Toma de demanda.

Para satisfacer esa demanda mensual es necesario definir una o varias "tomas" del sistema superficial. El concepto de "toma" se corresponde en principio a distintas procedencias de aguas, pero también puede ser utilizado a efectos de gestión para distinguir prioridades aunque el agua proceda del mismo punto, o incluso a suministros de distintas subzonas dentro de la zona considerada. Esta versatilidad se consigue al definir para cada toma, además del "nudo de toma", un valor de "dotación anual", superado el cual no se utiliza dicha toma hasta el siguiente año hidrológico; valores de "puntas mensuales", diferentes para cada mes y "números de prioridad" de cada toma, y que guardan relación con los números de prioridad de las tomas del resto de las zonas de la demanda.

Si una demanda se suministra mediante una sola toma, será suficiente con definir el número de prioridad asignado. Mientras que, si se suministra desde varias tomas, estas deberán tener asignada una dotación.

### 2.5.3. Elementos de bombeo

Un elemento de bombeo puede conectarse directamente a la demanda suministrada o puede conectarse al sistema superficial para contribuir con las demandas que se dan en este. Se define por el caudal máximo permitido, su prioridad de uso y la acción elemental del acuífero a la que se conecta.

### 2.5.4. Elemento retorno superficial.

La definición de este elemento es puramente funcional, pues hubiera sido posible simplemente definir un número de nudo donde se incorporan los retornos superficiales de las distintas tomas. Pero, se ha preferido definir los elementos de retorno, y que cada uno de ellos pudiera ser usado por una o más tomas de la misma o diferentes zonas.

Para definir el elemento de retorno simplemente es necesario suministrar al modelo el número del nudo donde se supone se incorporan los caudales correspondientes. Es posible definir varios elementos de retorno conectados a un mismo nudo o embalse.

## 2.6. Usos hidroeléctricos.

Son demandas no consuntivas, o sea que utilizan el agua y la reintegran durante el mismo período de tiempo sin consumir ninguna cantidad apreciable de ella. Como quiera que prácticamente el único caso de este tipo de demandas lo constituyen las centrales hidroeléctricas, se ha preferido utilizar este último nombre.

Para definir las es necesario definir el nudo de toma y el nudo de reintegro. Asimismo, se definen un "caudal máximo" (potencia máxima en el caso de centrales a pie de presa) y unos valores de "caudal objetivo" que pueden también definirse como series temporales y un "número de prioridad".

El cálculo de la producción de energía se realiza mediante el uso del salto bruto y de un coeficiente global de eficiencia. En el caso de una central a pie de presa el modelo calcula previamente el salto bruto mediante el uso de las curvas cota-volumen correspondiente al embalse. La energía producida en un mes se da como:

$$E = H_m * V_t * k$$

donde

$k$  es un parámetro que toma como valor:  $k [KWh/(m^3 \cdot hm)] = \eta * 2.7222$  Siendo  $\eta$  el rendimiento energético medio de la instalación.

$H_m$  es el salto bruto medio. En caso de central a pie de presa. Se calcula como:

$$H_m = \frac{\sum_{i=1}^n H(V_i) \cdot V_i}{V_T}$$

donde:

$H(V_i)$  es la cota correspondiente al embalse para un volumen  $V_i [m^3]$

$V_T$  es el volumen total de agua turbinado  $[Hm^3]$

$H_c$  es la cota a descontar para el cálculo de producción hidroeléctrica  $[m]$

Puede definirse para una central a pie de presa una cota mínima de la lámina de agua en el embalse para permitir el turbinado. En caso de que la cota media de agua en el embalse sea menor que dicha cota mínima, se anula el turbinado.

## 2.7. Acuíferos.

Los acuíferos son elementos del sistema, que están conectados con el resto del mismo mediante las acciones que este pueda ejercer sobre ellos, la mayor parte de dichas acciones han sido descritas anteriormente: filtraciones de embalses y tramos de río, conexión río-acuífero, infiltración profunda de zonas de riego, bombeos de las mismas, recarga artificial y bombeos adicionales.

Las conexiones entre los acuíferos y el sistema superficial se canalizan mediante dos conceptos que se definen a continuación:

### 2.7.1. Acciones elementales y parámetros de control.

Por **acción elemental** se entiende una acción o conjunto de acciones que se ejercen sobre el acuífero y que puede variar en intensidad a lo largo de la ejecución del modelo. Por ejemplo, es una acción elemental un bombeo en un pozo, mientras que el caudal bombeado en cada mes es su intensidad. Asimismo, es acción elemental el bombeo en varios pozos de una zona siempre que el reparto del bombeo total entre ellos pueda suponerse fijo, siendo la intensidad de la acción el valor del bombeo total en un mes. Los acuíferos modelados como agregados sólo admitirán una acción elemental, que es la recarga (positiva o negativa) pues en ellos es imposible distinguir su localización. En cambio, los acuíferos modelados como distribuidos admitirán varias acciones elementales.

Por **parámetro de control** se entiende cualquier respuesta del acuífero que interese conocer. Por ejemplo, el nivel en una celda, el volumen total en el acuífero, la relación río-acuífero. Los parámetros de control se utilizan como criterio para la definición de las reglas de operación para la explotación de acuíferos. Se puede impedir el bombeo cuando un parámetro de control dado alcance un valor inferior a un umbral dado.

Entre los parámetros de control se distingue los "**parámetros de control flujo**" que se corresponden a resultados del modelo subterráneo que constituyen flujos de agua hacia o desde el exterior. En el caso de acuíferos modelados por el método de los autovalores será necesario identificar estos.

Según el modelo matemático seleccionado para la simulación del acuífero se dispone de un conjunto específico de acciones elementales y parámetros de control.

### 2.7.2. Modelo tipo depósito.

Corresponde al caso en que el acuífero no está conectado hidráulicamente con el sistema superficial y únicamente interesa conocer un parámetro de indicación de su estado de llenado y vaciado. Este parámetro es el volumen almacenado. Los datos a aportar son el volumen inicial y la recarga natural del acuífero. El modelo utilizado es:

$$V_n = V_{n-1} + R_n + R_{LL}$$

El volumen a final de mes,  $V_n$ , es la suma del volumen a final de mes anterior (o inicial)  $V_{n-1}$ , la recarga en el mes,  $R_n$ , y la recarga natural  $R_{LL}$  que se incluye mediante 12 datos de recarga media mensual.

Este modelo de acuífero, sólo admite una acción elemental que es la recarga neta (acción elemental no.1) y un parámetro de control, que es el volumen almacenado (parámetro de control número 1).

### 2.7.3. Modelo tipo unicelular.

Corresponde al caso de un acuífero conectado hidráulicamente con el sistema superficial, con un coeficiente de desagüe,  $\alpha$ . Como puede demostrarse (Andreu, 1983) las ecuaciones que resultan son:

$$V_n = V_{n-1} + R_n - \alpha V_{n-1}$$

$$Q_n = Q_{n-1} + R_n - \alpha Q_{n-1}$$

La primera ecuación da el volumen a final de mes  $V_n$  en función del volumen final del mes anterior (o inicial),  $V_{n-1}$ , el coeficiente de desagüe  $\alpha$ , y la recarga en el mes  $R_n$ .

La segunda ecuación da el caudal de relación río acuífero  $Q_n$  en función del caudal en el mes anterior y demás factores ya explicados.

Los datos que habrá que procurar son pues el valor de  $\alpha$  y el de  $V_0$  (volumen inicial).

Si damos  $V_0=0$  y los valores de  $R_n$  son solamente los de las recargas netas de riegos estamos actuando por superposición, con lo que los valores de  $Q_n$  son las afecciones al caudal natural de los ríos. Esta es la forma en que se actúa en el modelo **SIMGES**.

Este modelo de acuífero sólo admite una acción elemental, que es la recarga neta (acción elemental no.1). Proporciona dos parámetros de control. El parámetro de control no.1 es el volumen  $V_n$  y el parámetro de control no.2 es el caudal de relación con el río. Si este es positivo es del acuífero al río, y si es negativo es del río al acuífero.

#### 2.7.4. Modelo tipo manantial.

Se denomina así al acuífero cuya relación con el sistema superficial es tal que este último recoge el drenaje del primero, normalmente por manantiales. Además, este modelo solo puede utilizarse en simulación por superposición al régimen natural. Si se requiere una modelación completa del acuífero, podrá hacerlo mediante el modelo tipo unicelular.

Para la simulación de estos acuíferos se utiliza un modelo agregado, en el que es necesario dar el valor del coeficiente de desagüe  $\alpha$ , el de los caudales aforados históricos del manantial con régimen natural,  $Q_a$ , y el del volumen inicial del acuífero  $V_{n-1}$  (Véase Sahuquillo, 1983).

El volumen a fin de mes del manantial viene dado por:

$$V_n = V_{n-1} - V_{DET} - V_n + RL_n + RC_n$$

donde  $RL_n$  es el valor de la recarga (o bombeo si el valor es negativo) lejos del manantial y  $V_{DET}$  es el volumen de detracción al río que no haya podido ser realizado el mes anterior.

El volumen total mensual de afección al río viene dado por:

$$Q_n = V_{n-1} - V_{DET} - V_n + RL_n + RC_n$$

como consecuencia de la integración de las fórmulas del caudal instantáneo desde tiempo  $t_{n-1}$  a  $t_n$  (1 paso de tiempo) y  $RC_n$  es la recarga cerca del manantial.

El volumen total mensual desaguado por el manantial sería:

$$Q_m = Q_a + Q_n$$

$Q_m$  de ser negativo, su valor absoluto no podrá ser superior al valor dado como aportación del manantial en régimen natural. De obtenerse un valor superior, la diferencia se acumulará como detracción imposible ( $V_{DET}$ ) para descontar en el paso siguiente de la simulación.

Se utilizan por tanto dos acciones elementales, la no. 1 es la recarga lejos del manantial y la no.2 es la recarga cerca del manantial. Al igual que en el caso del acuífero unicelular se tienen dos parámetros de control.

### 2.7.5. Modelo tipo pluricelular.

Se denomina así al acuífero cuya relación con el sistema superficial se produce según una ley representada por varios coeficientes de descarga identificados como celdas.

Para la simulación de estos acuíferos se utiliza un modelo pluricelular englobado (A.Sauquillo, 1983), en el que es necesario dar el valor del coeficiente de desagüe  $\alpha_i$  en cada celda, el de los coeficientes de reparto de cada acción elemental sobre cada una de las celdas  $b_{ij}$ , y el del volumen inicial del acuífero  $V_i^{k-1}$  en cada celda.

El volumen a fin de mes en cada celda viene dado por:

$$V_i^k = V_i^{k-1} + \sum_j R_j^k - \sum_j b_{ij} Q_j^k$$

donde  $R_j^k$  es el valor de la acción elemental j (recarga si es positivo o bombeo si el valor es negativo).

Para los caudales se tiene:

$$Q_j^k = \sum_i b_{ij} (V_i^k - V_i^{k-1}) + \sum_i \alpha_i (V_i^k - V_i^{k-1})$$

El volumen mensual de afección al manantial por cada celda viene dado por:

$$A = V^t - V^{t+1} + \sum_j D_j$$

El volumen total de afección al manantial es la suma de los volúmenes de afección de cada una de las celdas.

$$A^n = \sum_i A_i^n$$

En el caso de que este valor resulte negativo, se producirán las correspondientes detracciones de caudal de río (sobre la conducción conectada con este acuífero). Cuando sucede que el río no dispone de caudal suficiente para que se produzca dicha detracción se generan las llamadas "detracciones imposibles". Estas detracciones imposibles se descuentan en el mes siguiente del volumen almacenado en la celda cuya relación con el río es más rápida (la que tiene un valor de  $\alpha_i$  menor), para esta celda el valor de volumen a final del paso de tiempo anterior se modifica de la siguiente forma.

$$V_{CR}^{n+1} = V_{CR}^n + D$$

siendo CR el índice correspondiente a la celda más rápida y DI el valor de detracción imposible calculado para el paso de tiempo  $n-1$  (DI es negativo).

#### 2.7.6. Modelo tres niveles.

Para simular el caso en que un acuífero por ejemplo los de las Vegas Media y Baja del Segura, presenta la posibilidad de que se produzca evaporación a partir del acuífero, drenaje intermedio por la red de azarbes y conexión hidráulica con el río, se ha diseñado el modelo de acuífero de tres niveles. Las ecuaciones resultantes vienen explicadas como sigue:





Si  $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$  es suficientemente pequeño:



Si  $V_1 < A$



Lo mismo que en el caso de los acuíferos unicelulares con una sola salida, cuando existe una no linealidad, para calcular el volumen  $V_{k+1}$  en el intervalo siguiente hace falta conocer el volumen  $V_k$  no influenciado, o el volumen drenado por el acuífero en ese intervalo. También puede hacerse si se conoce la recarga  $R_k$  en el intervalo, pero éste es un dato que no suele conocer períodos algo largos

Los datos necesarios para la modelación son:

- Los valores de los coeficientes de desagüe  $\alpha_1$ , corresponden a la conexión río-acuífero y  $\alpha_2$  correspondiente al drenaje por azarbes o intermedio.
- Los valores mensuales de los coeficientes de desagüe  $\alpha_3$  por evapotranspiración potencial.
- Los volúmenes entre el nivel de conexión río-acuífero y el desagüe intermedio,  $A$ , entre este último y el nivel de cese de evaporación,  $A$ , entre este último y el nivel de cese de evaporación,  $B$ , y el volumen total inicial  $V_1$ .
- Los valores de la recarga histórica.

A partir de estos datos y de los valores de recarga neta (acción elemental no. 1), excluida la natural, el modelo proporciona los valores de relación con el río,  $Q_1$  (parámetro de control no.1), las salidas por azarbes,  $Q_2$  (parámetro de control no.2), la evaporación efectiva,  $Q_3$  (parámetro de control no.3), y el volumen a final de mes  $V_1$  (parámetro de control no.4).

Nótese que en este caso se actúa por superposición, sino que los valores son totales, por consiguiente, hay que tener cuidado si aguas abajo de la relación con el acuífero hay series de aportaciones, pues en ese caso deberían de ser corregidas de antemano descontando la relación histórica río-acuífero.

### 2.7.7. Modelo autovalores.

Corresponde a aquellos acuíferos para los que se considera necesario un modelo de parámetros distribuidos, y consecuentemente, una localización detallada de las acciones que se ejercen sobre dichos acuíferos, así como de las respuestas del acuífero.

Se ha utilizado para la modelación el método de los autovalores, pues está demostrado (Andreu y Sahuquillo, 1987) que es el más eficiente para sistemas que puedan ser supuestos lineales, en los que interese conocer unas pocas respuestas (parámetros de control) y sobre los que se ejerzan unas pocas acciones que puedan ser descritas como combinaciones lineales de unas acciones unitarias predeterminadas (acciones elementales).

Para su utilización será necesario obtener los parámetros necesarios, para lo cual el usuario deberá utilizar el programa AQUIVAL.

### 2.7.8. Resumen de acciones elementales y parámetros de control según el modelo seleccionado.

La siguiente tabla resume los parámetros característicos de cada modelo de simulación de acuíferos.

Modelo	Acciones elementales	Parámetros de control.	PCF
Depósito	1. Recarga	1. Volumen.	-
Unicelular	1. Recarga	1. Volumen. 2. Caudal conexión río.	2

Modelo	Acciones elementales	Parámetros de control.	PCF
Manantial	1. Recarga lejos de manantial 2. Recarga cerca de manantial	1. Volumen. 2. Caudal conexión río.	2
Pluricelular	n. Definidas por el usuario	1. Volumen. 2. Caudal conexión río.	2
Tres niveles	1. Recarga	1. Volumen. 2. Caudal conexión río. 3. Caudal salida azarbes. 4. Caudal salida evaporación.	2, 3
Autovalores	n. Definidas por el usuario	n. Definidas por el usuario	*

PCF: Parámetros de control considerados flujo de intercambio con el sistema superficial. A cada uno de ellos debe corresponderle una conexión con un tramo de río para que el balance del sistema se conserve.

(\*) El modelo de autovalores requiere obligatoriamente la definición de al menos 1 parámetro de control flujo. Este queda definido mediante la asignación de una acción elemental sobre la que se aplicará la compensación por detracciones imposibles. Aquellos que no tienen asignada acción elemental se entiende que no representan flujos de intercambio con el sistema superficial.

### 2.7.9. Elementos de recarga artificial y bombeo adicional.

Son elementos definidos simplemente a los efectos de conectar los posibles flujos controlados del sistema superficial al subterráneo (caso de las recargas artificiales) y/o viceversa (caso de los bombes adicionales).

En ambos casos, para definirlos es necesario dar el número del nudo del esquema de donde parten o adonde se incorporan y la capacidad máxima instalada.

El modelo, en la gestión, producirá recarga artificial siempre que existan sobrantes de aguas del sistema superficial disponibles aguas arriba de la toma de esta.

Los bombes adicionales (ya definidos en 2.5.3) son posibles extracciones de agua de un acuífero para su incorporación al sistema superficial y su utilización aguas abajo. En la gestión el modelo recurrirá a bombes adicionales siempre que los recursos superficiales sean insuficientes para el suministro de las zonas con un número de prioridad igual al designado a la hora de definir el bombeo adicional, y que el déficit en éstas supere un porcentaje dado de la demanda.

## 2.8. Indicadores y reglas de gestión.

Bajo esta denominación se reúne dos conceptos relacionados con la gestión de cuencas:

- El primero "**Indicadores**" trata de generar un índice o un indicador derivado de los resultados detallados sirva para resumir o agregar la información del estado del sistema en cada momento de la simulación.
- El segundo concepto es condicionar o alterar los criterios u objetivos de la gestión de acuerdo con un indicador obtenido previamente. Estas "**Reglas de operación**" se definen en dos conceptos: definición de la regla de operación y asignación de esta a uno o varios elementos.

Con estos indicadores se pretende reproducir pautas de gestión habituales en la gestión de cuencas como las normas de explotación o los indicadores y medidas definidos en los Planes Especiales de Sequía.

En el proceso de cálculo, se trata de criterios de gestión o reglas de operación cuya función es reducir el consumo de agua o incrementar la oferta cuando la reserva hidráulica del sistema, o de una parte de este, quede por debajo de límites especificados por el usuario. También puede utilizarse simplemente como un elemento de información agregada de la evolución del sistema.

Cada indicador viene definido por las variables de estado del sistema que intervienen en su cálculo y una función por la que se deduce las correcciones a aplicar en la gestión, y por las propiedades sobre las que aplica.

Se distingue tres partes diferenciadas para el diseño y manejo de estos indicadores.

1. Definición del indicador.
2. Definición de la corrección de asignaciones.
3. Selección de elementos sobre los que aplica.

A continuación se detalla la configuración de cada uno de estos componentes:

### 2.8.1. Definición del indicador.

En primer lugar, se define el indicador por los elementos que intervienen en su obtención y el método de cálculo a utilizar. Este indicador puede utilizarse simplemente como un

medio para obtener información resumida o agregada del sistema, o puede utilizarse como indicador para una regla de gestión. La definición es la misma en ambos casos.

Para la definición de un indicador sería suficiente con la elección de los elementos que van a combinarse para su cálculo, que, dependiendo de la opción elegida, pueden ser de los siguientes tipos:

1. Volumen en embalse.
2. Aportación superficial.
3. Parámetro de control en acuífero.
4. El resultado de otro indicador.
5. Serie temporal de datos dada específicamente para este fin.

Con respecto al método de cálculo se considera los 5 criterios utilizados en el módulo mensual SIMGES, y un sexto que emula el cálculo de los indicadores definidos en los PES definidos en España en la versión de 2018. Los primeros 5 criterios han sido extendidos para su aplicación en escala de tiempo inferior al mes, quedando su diseño como se indica a continuación.

### ***Indicadores definidos a principio de mes.***

Estos son los tipos definidos para el módulo SIMGES como:

1. Curva constante que se evalúa a 1 de mes.
2. Curva variable mensual definida todos los meses que se evalúa a 1 de mes.
3. Curva definida en uno o varios meses y de aplicación anual.

Para todos ellos se mantiene la definición dada en escala mensual. La curva definida se evalúa solamente para las condiciones dadas en el primer paso de cálculo del mes, y sus consecuencias se mantendrían durante todo el tiempo hasta el siguiente 1 de mes en que corresponda recalcularlo.

### ***Indicadores definidos como umbral de reservas.***

Estos son los tipos definidos para el módulo SIMGES como:

4. Umbral constante
5. Umbral variable mensual

Estos umbrales se definen también por meses, al igual que los anteriores, pero con una diferencia importante, que es que el valor del indicador se revisa en cada paso de tiempo y durante el proceso iterativo para evitar que el indicador rebase el umbral asignado.

### ***Indicadores basados en Planes Especiales de Sequía para unidades de explotación.***

El PES considera dos tipos de sequía: La sequía natural o sequía prolongada que se define a partir de datos en condiciones naturales (precipitación o aforo en río no alterado), para lo que define la "unidades territoriales a efectos de sequía prolongada". Y la sequía relacionada con la gestión, para lo que define "unidades territoriales a efectos de escasez" (UTE).

Estos elementos han sido desarrollados con el fin de emular en la medida de lo posible los indicadores de estado de sistemas establecidos en los Planes Especiales de Sequía españoles y que se definen como Índices de Estado de Escasez (IEE) por Unidad de Explotación.

EL modelo permite la definición de todos los parámetros de cálculo del indicador hasta obtener el valor estandarizado [0,1] a partir del cual se definiría el "estado" de la UTE para a continuación definir las correspondientes medidas de ahorro o movilización de recursos de emergencia. Según la formulación empleada en los PES de 2023 la expresión para la estandarización es la siguiente:

$$- \text{Si } V_i \geq V_{med} \Rightarrow I_e = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{V_i - V_{med}}{V_{p95} - V_{med}} \right]$$

$$- \text{Si } V_i < V_{med} \Rightarrow I_e = \frac{V_i - V_{p5}}{2(V_{med} - V_{p5})}$$

siendo:

$V_i$  - Valor de la variable estacionarizada en el mes de seguimiento

$V_{med}$  - Valor de centralización o de posición: mediana de la serie de referencia

$V_{p95}$  - Valor máximo: percentil 95 de la serie de referencia.

$V_{p5}$  - Valor mínimo: percentil 5 de la serie de referencia.

Para el cálculo de este indicador en cada variable se requiere los valores de  $V_{p95}$ ,  $V_{med}$  y  $V_{p5}$ .

En el caso de datos con diferencias estacionales en su valor es necesario previamente realizar la des estacionalización de la variable para lo cual se realiza la siguiente transformación (obtenida también del PES del Júcar)

$$V_i = \frac{U_{x,y} - \text{promedio } U_x}{\text{Desvest } U_x}$$

siendo:

$V_i$  - Variable estacionarizada en el mes de seguimiento

$U_{x,y}$  - Valor de la variable para el mes "X" y el año "Y"

$U_x$  - Valor de la variable en cualquier mes "X" de la serie de referencia.

En este caso será necesario también definir los 24 parámetros de promedio y desviación estándar para cada mes.

Estos elementos permiten manejar de forma combinada los 5 tipos de dato referidos en los indicadores anteriores. Permite también un coeficiente de ponderación por cada serie para acumular con el resto. Se puede incluir cualquier número de series de datos.

Si se usa como dato el resultado de otro indicador se deberá cuidar que no existan referencias circulares entre indicadores. Esta opción ha sido diseñada con el fin de obtener por separado un indicador para cada una de las series que componen el indicador del PES y combinarlas después. También para obtener índices agregados de varios índices parciales.

### 2.8.2. Cálculo de correcciones a realizar sobre el sistema.

Un indicador puede ser definido solo como medio para obtener información resumida del sistema, o puede utilizarse para alterar las asignaciones en el sistema.

Una vez definido un indicador se puede generar reglas de operación basadas en este indicador para ser aplicadas sobre uno o varios elementos del sistema como se indica en el apartado siguiente.

Una regla de operación es definida por una tabla de datos <Valor del indicador → factor corrector> de manera que el programa calculará un factor corrector para cada paso de tiempo interpolando en esta tabla.

### 2.8.2.1. Asignación de reglas de operación a los elementos del sistema.

Finalmente, para que una RO tenga efecto, se debe asignar a los elementos correspondientes. Estas RO pueden asignarse a los siguientes elementos y datos:

- Tomas de demandas: capacidad de suministro o dotación anual.
- Demandas: asignación.
- Conducciones: Caudal mínimo, caudal máximo o dotación anual.
- Aprovechamientos hidroeléctricos: caudal objetivo.

El factor corrector obtenido multiplica a la asignación en cada paso de la simulación según la definición del indicador.

### 3. Optimización de la gestión del sistema.

El programa resuelve la asignación del agua mediante dos procesos anidados. En primer lugar, una optimización matemática de una red de flujo conservativa que contiene las conexiones y limitaciones del flujo en todo el sistema. En segundo lugar, un proceso iterativo que modifica la red de flujo conservativa para corregir las desviaciones debidas a procesos no lineales como evaporación, acuíferos y asignaciones no lineales.

Este funcionamiento es similar al realizado por los módulos clásicos en escala mensual. Pero con algunas diferencias por el cambio de escala y prestaciones adicionales relacionadas con la bajada de escala temporal.

#### 3.1. Función objetivo y optimización

A partir del esquema del usuario y en base a los datos físicos y de prioridades proporcionados sobre el sistema, el modelo configura una red de flujo interna, mucho más compleja que el esquema del usuario. La confección de esta red y su posterior optimización mediante el uso de un algoritmo de redes de flujo conservativas sirve para:

- Introducir la dimensión temporal. En los modelos de optimización la red de flujo interna es una multiplicación del esquema del usuario que abarca los  $n$  períodos a optimizar. Las redes de un mes y la del siguiente están unidas por arcos de transferencia de agua de un mes a otro y que representan los elementos de almacenamiento (embalses y acuíferos).
- Contemplar las restricciones físicas del sistema: mantenimiento del balance de masas, de la ecuación de continuidad, capacidades máximas de las conducciones, de los embalses, etc...
- Introducir las prioridades entre las distintas demandas y tomas, y entre los distintos niveles de las mismas, incluidas las demandas de caudal mínimo en tramos de río.
- Encontrar aquella solución de gestión que satisface al máximo las demandas teniendo en cuenta las mencionadas prioridades en caso de escasez.

Esta red interna del modelo no trasciende al usuario en ningún momento.

La función objetivo planteada es lineal y, en pocas palabras, trata de minimizar la suma ponderada de déficits de caudales ecológicos, déficits de suministro a zonas de demanda (dando prioridad al suministro superficial frente al subterráneo), y maximizar el volumen almacenado en embalses, al final de cada período de optimización elegido.

Dado que las restricciones del problema (balance cero en los nudos, caudales máximos y flujos positivos) son también lineales, y el esquema de cuenca se convierte en una red de flujo conservativa, se utiliza para la optimización el algoritmo de resolución de redes de flujo conservativas Out-of-Kilter (Bazaraa y Jarvis, 1977).

En el caso de los módulos de optimización (AQT-OPT y AQT-RISK) Se entiende por "horizonte de estudio" el tiempo total, que se va a analizar. Dicho horizonte se puede simular mediante la optimización de períodos menores, de forma que la optimización de la gestión se realice para el primer bloque, y los valores del estado final de ese primer período optimizado sean utilizados como valores del estado inicial en la optimización del siguiente período de optimización, y así sucesivamente.

También se puede pedir un periodo de optimización mayor para luego quedarse solo con una parte de este periodo para realizar una segunda optimización. Por ejemplo: se puede pedir una optimización de 2 años, pero conservar sólo el primero para la segunda optimización.

### 3.1.1. Diseño de la función objetivo.

La función objetivo se construye como la composición de una red cerrada de arcos con diferentes capacidades y costes de flujo. La solución matemática busca el mínimo de la función objetivo. Por tanto, los arcos que representan objetivos tienen un coste negativo y los no interesantes tienen costes positivos.

El flujo en cada tipo de elemento se divide en la red de flujo entre varios arcos que representan fracciones diferentes del flujo en el mismo.

AQT-SIM y AQT-OPT construyen una red de flujo lineal que resuelve el reparto óptimo de acuerdo a la definición de arcos, capacidades y pesos asignados a cada uno. Cada elemento del modelo construye un conjunto de uno o varios arcos para regular su

comportamiento. El reparto final del agua se obtiene de la conexión de toda la red y la solución óptima del flujo en la misma.

La ecuación de la red de flujo es por tanto la siguiente:

$$f(x) = \sum_{t=1}^{nOpt} \left( \sum_{i=1}^{nEmb} E_i(x) + \sum_{i=1}^{nAcu} A_i(x) + \sum_{i=1}^{nCond} C_i(x) + \sum_{i=1}^{nDem} D_i(x) + \sum_{i=1}^{nCH} H_i(x) + \sum_{i=1}^{nBA} B_i(x) \right)$$

Donde cada sumando representa un elemento del modelo de simulación.  $nOpt$  es el número de pasos en la optimización. Estos elementos, según el tipo se componen de los siguientes sumandos:

### **Elementos tipo embalse.**

En su forma básica tiene el siguiente detalle:

$$E_i(x) = (KEMB3MAX + KEMB5P * NP) * V_f$$

Donde:  $V_f$  es el volumen embalsado a final del paso de tiempo;  $NP$  es el número de prioridad del embalse;  $KEMB3MAX=-1100$  es la constante de ponderación para las reservas en embalse a final del periodo de optimización y  $KEMB5P=1$  es el coeficiente de reducción por el número de prioridad. Para volúmenes a final de pasos intermedios de la optimización se prescinde de  $KEMB3MAX$  y  $KEMB5P$  se sustituye por el parámetro  $KEMB5P2=0$ .

Si este tiene un embalse "muerto" no accesible la ecuación se amplía con un sumando para esta fracción del volumen embalsado

$$E_i(v) = (KEMB3MAX + KEMB5P * NP) * (V_f - V_m) + KEMB1 * V_m$$

Donde  $V_m$  representa el volumen muerto del embalse y  $KEMB1=-20000$  es el parámetro que pondera esta reserva.

Si se ha definido fracciones del volumen embalsado (al modo de SIMGES) la ecuación se extiende en la siguiente forma:

$$E_i(v) += (Kmin * (Vmin - Vm)) + \sum_{j=2}^n (V_j - V_{j-1}) * K_j + (V_c - V_n) * KEMB7VMAX$$

Donde  $Vmin$  es el volumen mínimo;  $Kmin = KEMB2MIN + (KEMB5P * NP)$  con  $KEMB2MIN = -15000$  el parámetro para conservar el embalse mínimo de gestión;  $V_j$  el volumen de embalse definido para cada zona; y  $K_j = (KEMB3MAX + KEMB6N * j + (KEMB5P * NP))$  el parámetro de ponderación para la zona  $j$ ,  $KEMB6N = +20$ ;  $n$  es el

número de fracciones de embalse (3 para SIMGES).  $K_j$  solo suma en el último paso de tiempo de la optimización, para los anteriores sería =0.

Además, para niveles por encima del máximo de gestión definido ( $V_n$ ) se asigna un coste de  $KEMB7VMAX=8500$  para penalizar almacenamientos por encima del máximo de gestión hasta la capacidad  $V_c$ .

Según esta configuración de pesos, cuando un embalse se define solo por su capacidad, esta tendrá una prioridad de almacenamiento igual al nivel más bajo por encima del mínimo definida en cualquier embalse con niveles de gestión.

Si se define un embalse máximo este genera un nuevo espacio entre el máximo y la capacidad donde el almacenamiento está penalizado y solo dejará agua si aguas abajo se encuentra una penalización al flujo, como lo es la definición de un control de crecidas en un tramo de río.

### ***Acuíferos.***

Los acuíferos tienen una representación reducida en la red de flujo con la finalidad de mantener el balance y contabilizar deficiencias en la formulación del acuífero como son las detracciones imposibles.

La participación en la función objetivo de estos elementos es como sigue:

$$A_i(v) = KACU2VF * V^- + KACU3DI * DI$$

Donde:  $V^-$  es el volumen final cuando este es negativo;  $KACU2VF=1$  el parámetro para penalizar volúmenes negativos;  $DI$  es el déficit en la detracción de caudal del río respecto a lo calculado por la formulación del acuífero,  $KACU3DI=20000$

### ***Conducciones.***

Las conducciones se trazan en general sin límites ni condiciones.

Se permite la asignación de un coste arbitrario que favorece o penaliza el flujo en la conducción, en tal caso la ecuación sería:

$$C_i(q) = K_{us} * Q_i$$

Siendo:  $K_{us}$  el dato de coste definido por el usuario y  $Q_i$  el caudal que circula por la conducción.

Si en la conducción se define un caudal mínimo, este se puede fraccionar por niveles (al estilo de OPTIGES). En este caso se suma

$$C_i(q) += \sum_{j=2}^n (q_j) * Kc_j$$

Donde:  $q_j$  representa la fracción de caudal en cada nivel  $j$  de caudal mínimo; y  $Kc_j = KCOND1 + KCOND3N * j + KCOND2P * NP$  ; con:  $KCOND1=-10000$ ;  $KCOND3N=200$ ;  $KCOND2P=5$ . Si el caudal mínimo no se fracciona en niveles se aplica esta ecuación con  $j=1$ .

Si se define un caudal máximo para control de crecidas

$$C_i(q) += KCOND4MAX * Q_m$$

Siendo:  $Q_m$  el caudal por encima del máximo y  $KCOND4MAX=40000$  el parámetro que penaliza caudales por encima de tal máximo

### Modelo AQT-OPT

En caso de darse caudales por encima del máximo,  $Q_m > 0$ , El modelo AQT-OPT en el proceso iterativo, a partir de la segunda iteración trata de minimizar el caudal máximo laminándolo a lo largo del periodo de optimización. Para ello se amplía el función objetivo con la siguiente expresión:

$$C_i(q) += KCOND5QM2 * Q_{m2} + KCOND4MAX * Q_{m1}$$

Donde  $Q_{m2}$  es el valor de caudal por encima del máximo sobre el que actúa el proceso iterativo;  $Q_{m1}$  representaría el caudal restante por encima de  $Q_m + Q_{m2}$ ; y  $KCOND5QM2=39000$  es el coste asignado al caudal laminado. El valor de  $Q_{m2}$  final lo determina el proceso iterativo. Para evitar esta laminación se podría igualar  $KCOND5QM2$  a  $KCOND4MAX$ .

### **Demandas.**

Las demandas se componen de dos o más sumandos, uno por la demanda y otro por cada una de las tomas definidas

$$D_i(q) = (KDEM1 * D) + \sum_{j=1}^{nT} (S_j * KDEM2T * NP_j)$$

Donde:  $D$  es el suministro a la demanda;  $KDEM1=-1600$ ;  $S_j$  el suministro a través de la toma  $j$ ;  $KDEM2T=5$ ; y  $NP_j$  el número de prioridad asignado a la toma  $j$ .

Si la demanda se fracciona en tramos (como OPTIGES) el primer sumando se divide en los siguientes:

$$\sum_{j=0}^{nDiv-1} (KDEM1 - j * KDEM3N) * D_j$$

Siendo:  $D_j$  el suministro a la fracción de demanda  $j$ ;  $KDEM3N=90$

### **Usos hidroeléctricos.**

Las centrales hidroeléctricas pueden definirse con y sin caudal objetivo, en el primer caso la función objetivo queda:

$$H_i(q) = Q * (KCH1MAX + NP)$$

Siendo:  $Q$  el caudal suministrado a la central;  $KCH1MAX= -10$  el peso asignado al caudal turbinado; y  $NP$  el número de prioridad de la hidroeléctrica.

Si además se define un caudal objetivo la función se amplía como sigue:

$$H_i(q) = Q_{obj} * (KCH2OBJ + CH1MAX + NP) + Q_m * (KCH1MAX + NP)$$

Donde:  $Q_{obj}$  es el caudal suministrado hasta el valor de caudal objetivo;  $Q_m$  es el caudal restante por encima del objetivo; y  $KCH2OBJ=-1200$  es el beneficio asignado al suministro de agua hasta el caudal objetivo.

$(KCH2OBJ+kCH1MAX)=-1210 < KEMB3MAX=-1100$  supone que la central hidroeléctrica podrá desembalsar agua de todas las zonas del embalse excepto en embalse mínimo. Este es el planteamiento de SIMGES. Se puede subir este parámetro para que los volúmenes objetivo sirvan como límite de desembalses para turbinado. Por ejemplo, con un valor de  $-1090$  no desembalsaría de la zona 1 por encima del volumen mínimo.

### **Bombeo adicional.**

El coste asociado a los bombeos se construye en base a los parámetros de coste de la demanda para que este quede por debajo del número de prioridad que lo hace actuar y por encima del siguiente.

$$B_i(b) = b * (KDEM1 + KDEM2T * (iNP + 1) + KDEM3N * iNiv)$$

En la cual:  $b$  es el valor bombeado;  $iNP$  el número de prioridad que lo activa; y el tercer sumando se activa si se definen varios niveles de suministro en la demanda, en caso contrario  $iNiv=0$ .

### 3.1.2. Resumen de prioridades de flujo en la función objetivo.

En líneas generales, si se ordena las prioridades de flujo de agua por cada elemento del río, quedaría como sigue:

Concepto	Valor	Variable
Embalses: Embalse muerto	-20 000	KEMB1
Conducciones: Caudal mínimo	-15 000 +200*niv +5*pri	KCOND1 KCOND3N KCOND2P
Embalses: Volumen mínimo de gestión	-15 000 +5*pri	KEMB2MIN KEMB5P
Demandas: Suministro a la demanda	-5 000 +200*niv +5*pri	KDEM1 KDEM3N KDEM2T
Aprovechamientos hidroeléctricos: caudal objetivo	-800 -10+pri	KCH2OBJ KCH1MAX
Embalses: Volúmenes de gestión. Solo el último tramo de tiempo.	-700 -200*niv +5*pri	KEMB3MAX KEMB6N KEMB5P
Embalses: Volúmenes de gestión. Meses intermedios de la optimización	-20*niv +1*pri	KEMB6N2 KEMB5P2
Aprovechamientos hidroeléctricos: flujo hasta caudal máximo	-10 +pri	KCH1MAX
Acuíferos: Almacenamiento negativo. Durante la optimización y a final de esta.	1 1	KACU1V KACU2VF

Concepto	Valor	Variable
Acuíferos: penalización en arcos de salida en a.e. y de entrada en p.c.f.	1	KACU3DI
Embalses: Vertido por aliviadero sobre embalse máximo de gestión.	1 000	KEMB4VER
Embalses: Almacenamiento por encima del volumen máximo hasta la capacidad	8 500	KEMB9VM
Conducciones: Caudal máximo tolerado	40 000 39 000	KCOND4MAX KCOND5QM2

niv: nivel o fracción considerada en la asignación a este elemento.  
pri: número de prioridad de elemento.

### 3.1.3. Grupos isoprioritarios.

Puede definirse para distintas tomas de distintas demandas de uso consuntivo el mismo número de prioridad, en cuyo caso formarán parte del mismo "grupo isoprioritario". El modelo se encarga entonces de, en caso de que exista déficit en el suministro, repartir el agua disponible proporcionalmente al valor de la demanda (punta) definida para cada toma del grupo isoprioritario. Esto se hará siempre que sea posible, aunque puede haber situaciones en las que no lo sea, como por ejemplo en el caso de que sea imposible repartir un déficit de una zona muy aguas arriba que no recibe agua de aportaciones intermedias.

Adicionalmente se puede ordenar al optimizador que iguale el % de la asignación a las tomas de igual prioridad durante todo el periodo de optimización, con independencia de que en algunos pasos de tiempo se pudiera entregar más agua sin penalizar a otros objetivos. Esto reduce la eficiencia en la optimización del reparto de agua, pero tiene sentido para demandas agrarias cuya asignación se establece al principio de la campaña de riego y esto implica una superficie de siembra. En este caso la asignación inicial habría de mantenerse durante todo el periodo de cultivo.

Este control se realizará en el proceso iterativo y solo se hará para los números de prioridad para los que se ha pedido.

### 3.2. Proceso iterativo.

Tratamiento de las no linealidades y efecto sobre la función objetivo.

El algoritmo de cálculo principal que se utiliza requiere una red de flujo con comportamiento lineal. Sin embargo, existen muchos procesos en la naturaleza y en la toma de decisiones para la gestión que no pueden tratarse de forma lineal (evaporación, filtraciones, revisión de asignaciones, etc).

Para resolver estos condicionantes se realiza un proceso iterativo que modifica las asignaciones con el objetivo de aproximar la mejor solución en cada uno de los aspectos considerados.

Las iteraciones terminan cuando se alcanza una cierta convergencia de los resultados configurada según el tipo de fenómeno tratado en cada caso.

Los procesos no lineales son los siguientes:

- 1) Evaporación (precipitación) en embalses.
- 2) Filtración en río y embalse.
- 3) Filtración y retorno en demandas.
- 4) Simulación de acuíferos.
- 5) Conexión río-acuífero.
- 6) Control de crecidas en tramos de río.
- 7) Capacidad máxima de tomas en embalse.
- 8) Igualdad de suministro en grupos isoprioritarios.



## 4. Resultados

Los programas producen varias salidas de resultados en diferentes formatos y escalas de agregación. Dependiendo del modelo de cálculo utilizado, la escala temporal y opciones seleccionadas por el usuario. Todo ello diseñado para servir de la manera más eficiente a diferentes estilos de trabajo.

En términos generales, los resultados producidos son los siguientes:

- Series completas de resultados en formato de tabla para su manejo mediante una hoja de cálculo.
- Series completas de resultados en formato de base de datos para su visualización gráfica en la aplicación y el manejo mediante herramientas de bases de datos.
- Series agregadas de resultados en escala mensual y anual.
- Resumen de resultados en escala de año medio para balances.
- Resumen interpretado de datos y resultados para su impresión o lectura directa.
- Estadísticas de resultados en el módulo de análisis probabilístico.

A continuación se describe en detalle cada uno de los formatos de resultados.

## 4.1. Series de resultados de la simulación u optimización de la gestión en la escala de cálculo.

Todas las series de resultados de la simulación son escritos en un único archivo con formato CSV con el nombre del elemento en el encabezado y la fecha de cada paso en la primera columna. El resto de columna contienen cada una de las series de resultados, que vienen identificadas en el encabezado. Este archivo tiene el nombre "aqtTablaCaudal.csv" y se encuentra en la carpeta de trabajo del modelo.

Los encabezados se componen de 6 caracteres indicativos del tipo de elemento seguidos del nombre del elemento tal como se describe en la siguiente tabla.

Dígitos 1 a 3	Valor	Dígitos 4 a 6	valor	CodTipo
Ap_	aportación	Ap_	Caudal	310
Em_	Embalse	Vl_	Volumen	322
		En_	Caudal entrada	321
		Sl_	Caudal salida	324
		Ev_	Evaporación (solo si existe)	326
		Pr_	Precipitación (solo si existe)	328
		Fl_	Filtración (solo si existe)	327
		Vr_	Vertido (solo si se define máximo de sueltas controladas)	325
Dc_	demanda consuntiva	Dt_	dotación	304
		Sm_	suministro	300
		Df_	déficit	303
		Bb_	bombeo	301
		Fl_	filtración	305
		Tm_	Toma	302
		Sp_	Para el caso de demandas agrarias se incluye un resultado denominado "suministro en parcela" que es el suministro bruto reducido por el retorno o la eficiencia en la conducción.	306
Rt_	Retorno	Rt_	caudal	380
Te_	toma de embalse	Mx_	máximo	312
		Ql_	caudal	313
Ch_	hidroeléctrica	Ql_	caudal	391
		Al	Altura de salto (en metros)	392
		Pr	Producción (en GWh)	393
Tr_	tramo de río	Ql_	caudal	330
		Fl_	filtración	341
		Qm_	Caudal mínimo	342

Dígitos 1 a 3	Valor	Dígitos 4 a 6	valor	CodTipo
		Df_	Déficit en caudal mínimo	343
Aq_	Acuífero	Vl_	Volumen	420
		PC_	Parámetro de control	422
		AE_	Acción elemental	423
		SS_	Salida del sistema	424
		DI_	Detracción imposible	425
Ba_	Bombeo adicional	Ql_	Caudal bombeo	400
Ro_	regla de operación	Vl_	Volumen simulado	430
		CR_	Coeficiente de restricción	431

La primera columna contiene el identificativo de fecha que tendrá el formato de Paso\_AAAA o DD/MM/AAAA según que el paso temporal se mida en fracciones del año o en días.

Todos los resultados de flujos tendrán unidades de m<sup>3</sup>/s, con las siguientes excepciones: Volúmenes de embalse y resultados para acuífero que van en hm<sup>3</sup>. Altura de salto en aprovechamiento hidroeléctrico (en metros). Producción hidroeléctrica (en GWh).

Los resultados pueden ser visualizados con el editor de gráficos de Aquatool+ (Egraf). Para ello se genera un segundo archivo de texto con la descripción de qué serie de resultados contiene cada columna, con el nombre "aqtGraf.info".

Los mismos resultados pueden obtenerse en otro archivo, también con formato CSV, pero con los datos ordenados para ser cargados en el estilo de una base de datos con los campos que se listan en la tabla siguiente. Este archivo tiene por nombre "aqtBDCaudal.csv".

Tabla: aqtBDCaudal.csv	
Campo	Contenido
Annio Paso Fecha	Fecha de cada paso de la simulación: Annio, Paso si es el paso de tiempo se mide en fracciones del año; o Fecha en caso de medirse en días.
TipoElem	Descripción del tipo de elemento
CodElemento	Código numérico del elemento a que corresponde el resultado.
NomElem	Etiqueta "nombre" dado al elemento.
TipoResultado	Descriptor del tipo de resultado.
Valor	Cada uno de los valores del resultado.

<i>Campo</i>	<i>Contenido</i>
<i>Cod2Resultado</i>	Solo para algunos tipos de resultados. Código numérico que lo diferencia de otro resultado similar. Este código se utiliza para resultados tipo parámetros de control de acuíferos.

La escritura de este archivo es opcional y los resultados a presentar en el mismo se pueden seleccionar para reducir el tamaño del archivo.

## 4.2. Series de resultados resumen en escala mensual y anual.

Si la escala de cálculo lo permite se producirá también un archivo de resultados acumulados en escala mensual. Este tendrá el mismo formato que el anterior.

No se genera resultados resumen en el modelo AQT-RISK ni en otros modelos cuando el tiempo se mide según el calendario, salvo que el paso de cálculo sea el día.

Los archivos con resultados anuales y de año medio para balances tiene el mismo formato y series que el primero, pero con resultados acumulados resumen.

A diferencia de los resultados en la escala de simulación, en este **caso todos los resultados estarán en unidades de  $\text{mm}^3$** . Salvando algunas excepciones lógicas como la altura de salto en centrales hidroeléctricas que dará el valor promedio en metros, y la producción hidroeléctrica que se da en GWh.

1. Resultados acumulados en escala mensual ("aqtTablaAcumulado.csv" y "aqtGrafAcum.info").
2. Resultados acumulados en escala anual ("aqtTablaAnual.csv" y "aqtGrafAnual.info").

### 4.3. Resumen de resultados y garantías.

También se genera un archivo con el año promedio de resultados en el paso de tiempo de cálculo, y con los resultados de garantías por tipos de elementos.