

Los caudales establecidos en la Tabla 1 estarían sujetos a algún tipo de excepcionalidad tal y como se señala en el apartado 3 del artículo 3 del Protocolo Adicional:

- a) *El caudal integral anual referido en el apartado anterior no se aplica en los periodos en que la precipitación de referencia acumulada en la cuenca desde el inicio del año hidrológico (1 de octubre) hasta el 1 de junio sea inferior al 65% de la precipitación media acumulada de la cuenca en el mismo periodo. El periodo de excepción se considera concluido a partir del primer mes siguiente a diciembre en que la precipitación de referencia acumulada en la cuenca desde el inicio del año hidrológico fuera superior a la precipitación media acumulada en la cuenca en el mismo periodo.*
- b) *El caudal integral trimestral referido en el apartado 2 no se aplica en los trimestres en que la precipitación de referencia acumulada en un periodo de seis meses hasta el día 1 del tercer mes del trimestre sea inferior al 65% de la precipitación media acumulada en la cuenca en el mismo periodo.*

2.5.2. Plan Hidrológico Nacional

El artículo 7 de la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional está referido a los acuíferos compartidos, considerando como tales los que estando situados en ámbitos territoriales de dos o más Planes Hidrológicos de cuenca se enumeran en el anexo 1 de la citada Ley; para éstos es el propio Plan Hidrológico Nacional el que realiza la asignación de recursos entre las cuencas afectadas.

De todos modos, esta cuestión no se ha tenido en consideración a la hora de abordar el análisis de las aguas subterráneas en los modelos que reproducen los sistemas de explotación.

3. ANTECEDENTES

El Plan Hidrológico de la cuenca del Duero, actualmente en vigor, se aprobó por Real Decreto 1.664/1998, de 24 de julio (BOE de 11 de agosto de 1998). Con posterioridad al Real Decreto de aprobación se publicó la parte normativa mediante Orden Ministerial del 13 de agosto de 1999 (BOE de 28 de agosto). Este Plan Hidrológico conforma un marco donde se establece una ordenación de los usos del agua en el ámbito de la cuenca mediante la asignación y reserva de los recursos existentes. Los objetivos del Plan eran conseguir la mejor satisfacción de las demandas de agua y equilibrar y armonizar el desarrollo regional y sectorial, incrementando las disponibilidades del recurso, protegiendo su calidad, economizando su empleo y racionalizando sus usos en armonía con el medio ambiente y con los demás recursos naturales (Art. 38.1 Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas, en su versión anterior a la transposición de la Directiva Marco del Agua).

Los documentos anteriormente mencionados están disponibles para su descarga en la página web de la Confederación Hidrográfica del Duero (www.chduero.es), donde pueden localizarse dentro de la sección de Planificación.

Con el fin de conseguir una estructuración adecuada de la cuenca ateniéndose a las regulaciones, usos e imbricaciones existentes en la red fluvial se optó por la definición de 12 sistemas de explotación (actualmente 13) en los que para cada demanda caracterizada se procede a la asignación de los recursos correspondientes. En principio esta metodología se seguía para aquellas demandas que, o bien estaban reguladas, o bien se planteaba la posibilidad de que lo estuviesen en un horizonte más o menos lejano.

4. METODOLOGÍA

4.1. Herramienta informática utilizada

Para abordar la simulación de los sistemas de explotación (apartado 3.5.1.2 de la IPH) se ha utilizado el entorno de desarrollo AQUATOOL creado y puesto a disposición por los técnicos del Instituto de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). AQUATOOL es un sistema de soporte de decisión que ofrece herramientas avanzadas de fácil utilización para abordar los problemas habituales encontrados a la hora de planificar y gestionar el uso del agua en una cuenca. El sistema consta de una serie de módulos (destacando sobremanera SIMGÉS, que permite la elaboración de modelos de simulación de la gestión de cuencas para la planificación y gestión de recursos

hídricos, y GESCAL, que permite la creación de modelos de simulación de la calidad del agua) que están integrados en un sistema gestor único, en el que la unidad de control del usuario permite la definición gráfica del esquema del sistema hídrico, el control de las bases de datos, la utilización de los módulos mencionados y el análisis gráfico de los resultados. Estas capacidades pueden ser utilizadas en un sistema de recursos hidráulicos para:

- Filtrar alternativas de diseño mediante el módulo de optimización.
- Filtrar alternativas de gestión mediante el uso del módulo de optimización obteniendo criterios de operación a partir del análisis de los resultados óptimos.
- Comprobar y refinar las alternativas filtradas mediante el uso del módulo de simulación.
- Llevar a cabo análisis de sensibilidad comparando los resultados después de cambios en el diseño o en las reglas de operación.
- Llevar a cabo análisis de riesgo simulando u optimizando con diferentes series sintéticas hidrológicas (análisis de Monte-Carlo).
- Ganar conocimiento del sistema en los aspectos físicos y de gestión. Y también ganar en el aspecto de organización de datos.
- Utilizar el módulo una vez que se implanta una alternativa como una ayuda en la operación del sistema de recursos hidráulicos (*off-line*), principalmente para reparto de recursos entre demandas conflictivas, y para estudiar impactos de cambios en el sistema.
- Utilizar la propia unidad de control para la localización georreferenciada de los elementos de los esquemas, traslado de datos entre los módulos de simulación y de optimización, exportación de la información gráfica a formatos usuales de tratamiento gráfico, y, en particular, al visor del sistema de información de la Confederación Hidrográfica del Duero (Mírame-IDEDuero).

En estos modelos se relacionan y vinculan los distintos componentes de los sistemas de explotación: masas de agua superficial, masas de agua subterránea, series de aportaciones naturales, recarga de acuíferos, infraestructuras (embalses, canales), demandas, retornos, vertidos, evaporación en embalses, pérdidas según eficiencias, reglas de operación, caudales ecológicos, reservas para laminación, criterios de garantía y objetivos ambientales. Entre los muchos resultados que ofrecen estos modelos se encuentran los balances requeridos para la preparación del Plan Hidrológico, tal y como se presentan en el capítulo concerniente a cada sistema de explotación.

La simulación y gestión del sistema superficial se efectúan a un tiempo mediante el uso de un algoritmo de optimización de redes de flujo conservativo. Dicho algoritmo se encarga de determinar el flujo en el sistema tratando de satisfacer al máximo los objetivos múltiples de minimización de déficit y de máxima adaptación a las curvas del volumen objetivo de embalse y objetivos de producción hidroeléctrica.

4.2. Niveles de garantía

Se siguen las pautas marcadas por la IPH. Ésta hace distinciones en función del tipo de demanda analizada.

En el caso de las demandas agrarias en el apartado 3.1.2.3.4 se indica lo siguiente: *A efectos de la asignación y reserva de recursos, se considerará satisfecha la demanda agraria cuando: a) El déficit en un año no sea superior al 50% de la correspondiente demanda. b) En dos años consecutivos, la suma de déficit no sea superior al 75% de la demanda anual. c) En diez años consecutivos, la suma de déficit no sea superior al 100% de la demanda anual.*

En lo que concierne a las demandas urbanas en el apartado 3.1.2.2.4 se señala lo siguiente: *A efectos de la asignación y reserva de recursos se considerará satisfecha la demanda urbana cuando: a) El déficit en un mes no sea superior al 10% de la correspondiente demanda mensual. b) En diez años consecutivos, la suma de déficit no sea superior al 8% de la demanda anual.*

En las demandas industriales, en el apartado 3.1.2.5.4, se dice que la garantía no habrá de ser superior a la que se hubiese considerado para la demanda urbana. En la práctica se seguirá el mismo criterio especificado para las demandas urbanas.

Caso aparte lo constituye la acuicultura puesto que en la IPH no se concretan unos niveles de garantía. Atendiendo a la prelación de usos fijada por el Plan Hidrológico de la Cuenca de Duero, el criterio de cumplimiento de la demanda no habría de ser más exigente que los comentados con anterioridad para

otros usos, y en particular no debería ser más estricto que para las demandas agrícolas. Por tanto, se asume como buena la garantía indicada para las demandas agrarias.

4.3. Escenarios de análisis

Hay cuatro horizontes de análisis: 2009, 2015, 2021 y 2027.

En la modelación se contemplan dos periodos hidrológicos de análisis: la serie larga y la serie corta. La serie larga consta de 66 años hidrológicos comprendidos entre 1940/1941 y 2005/2006; sin embargo, la serie corta cuenta con 26 años desde 1980/1981 hasta 2005/2006.

Ateniéndonos a lo que indica la IPH en su artículo 3.5.3, y citado en el epígrafe correspondiente de este anejo, el horizonte 2015 se erige como clave en el capítulo de asignación y reserva de recursos.

El horizonte 2027 destaca, además de los elementos nuevos y soluciones que le son propios, por la disminución que experimentan las aportaciones como consecuencia de la evaluación del efecto del cambio climático.

Se supone que en el horizonte 2015 todas las infraestructuras y demandas que actualmente están en construcción o en fase de desarrollo avanzado estarán en explotación. Todo aquello que son embriones o forman parte de planteamientos antiguos que no muestran una concreción clara en el momento presente se definen como plausibles para los horizontes 2021 y 2027.

4.4. Esquemas de modelación

En el análisis de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Duero se han diseñado seis grafos o esquemas de simulación. Cinco de ellos se consideran modelos detallados que engloban varias zonas de explotación y uno representa la totalidad de la cuenca.

En cuanto a los modelos detallados la relación es la siguiente: Esla, Pisuerga, Alto Duero, Adaja y Tormes.

4.4.1. Esla

Incluye los sistemas de explotación Támeaga-Manzanas, Tera, Órbigo y Esla. El Esla se muestra como un eje vertebrador que, además del río descriptor del sistema homónimo, aúna a los ríos Órbigo y Tera al ser afluentes del mismo.

El SE Támeaga-Manzanas es un sistema muy singular y aislado constituido por una serie de ríos independientes entre sí que vierten directamente a la parte portuguesa de la DHD.

4.4.2. Pisuerga

Formado por los sistemas de explotación Carrión, Pisuerga, Arlanza y Bajo Duero. Los ríos Carrión y Arlanza son tributarios del Pisuerga. La inclusión del Bajo Duero en el modelo se debe a que los usos de dicho sistema de explotación estarían regidos de manera fundamental por las regulaciones de la cabecera del Pisuerga (Aguilar, La Requejada y Cervera).

En el Carrión se incluye una aportación adicional, no natural, que representaría los recursos procedentes del Esla y cuyo destino sería el Canal de Castilla Campos.

4.4.3. Alto Duero

Se integran en este modelo los sistemas de explotación del Alto Duero y del Riaza.

El Alto Duero comprende el tramo de río Duero hasta su unión con el río Riaza; desde ese momento, y hasta la confluencia con el Pisuerga, se habla de sistema de explotación Riaza, condicionado por las regulaciones de los ríos Riaza y Duratón, además del Embalse de Cuerda del Pozo en la cabecera del Duero.

4.4.4. Adaja

Constituido por los sistemas de explotación Cega-Eresma-Adaja y Bajo Duero. Este último aparece tanto en el esquema del Pisuerga como en el del Adaja y se incluye en este modelo porque permite evaluar mejor la interrelación existente con los acuíferos. Hay que tener en cuenta que las masas de agua superficiales que constituyen las zonas de explotación Bajo Duero y Adaja están relacionadas con acuíferos comunes.

Quizás sea en el modelo global del Duero donde pueda efectuarse un análisis más completo, al incluirse de forma conjunta todas las imbricaciones existentes y obtener los resultados más concluyentes.

4.4.5. Tormes

Aúna los sistemas de explotación Tormes y Águeda.

Tormes y Águeda son dos ríos independientes que desembocan en el denominado tramo internacional de Duero.

La complejidad del Tormes estribaría en la dificultad de simular convenientemente la central hidroeléctrica de Villarino (cuestión que se deja para el modelo completo del Duero) y la relación de la zona regable de la Armuña con las masas de agua subterráneas, ya que la infiltración de las aguas de riego serviría para recargar un acuífero que no está simulado en dicho modelo y que está vinculado con masas de agua superficiales pertenecientes al Bajo Duero.

4.4.6. Duero simplificado

Este grafo representa la totalidad de la parte española de la cuenca del Duero. No se simulan los ríos que vierten directamente a la parte portuguesa (Támega, Tuela, Manzanas...). Su consideración sería más acertada si también se procediese a la definición del Duero en Portugal.

En este diseño se plasman a grandes rasgos las infraestructuras capitales de la cuenca y la mayoría de usos consuntivos. El esquema de la red fluvial trata de ser lo más completo posible representando los usos que tienen una mayor trascendencia en la gestión integral de la cuenca.

4.5. Aspectos a tener en cuenta en la simulación

En este epígrafe vamos a describir todos los pormenores de cada uno de los elementos de la simulación que son comunes a los esquemas de simulación y sistemas de explotación analizados.

4.5.1. Masas superficiales

La cuenca del Duero está formada por 689 masas superficiales aunque no se simula más que una parte de ellas. Muchas masas no presentan un especial interés en cuanto a su simulación puesto que se tratan de ríos o arroyos de escasa relevancia que no tienen ningún uso consuntivo asociado. Además, se requiere una adecuada simplificación si se desean esquemas de trabajo manejables.

Cada masa superficial definida en el conjunto de la Demarcación Hidrográfica no tiene una representación única en la modelación, esto es, un arco por una masa, sino que han de tenerse en cuenta toda las afecciones, presiones y singularidades existentes en el tramo, por lo que en el diseño del modelo una masa aparece fragmentada en función de las necesidades y particularidades de cada sistema. Así, nos encontramos, por ejemplo, con que la masa 47 aparece dibujada con 5 arcos, tres pertenecientes al río Órbigo y otros dos al río Tuerto. Las particiones de las masas se realizan con letras añadidas al número de masa siguiendo el orden alfabético.

4.5.2. Masas subterráneas

La caracterización de los acuíferos proviene de la propia definición de masas subterráneas. Así, teniendo presente la concepción de sistema de explotación, se efectúa el cruce de los sistemas de explotación con las masas de agua subterránea de la cuenca del Duero; los recintos resultantes tendrían la consideración

de acuífero, en lo que atañe a su inclusión en el modelo, y cada acuífero tendría asociados unos bombeos que conciernen a algunas demandas urbanas, agrarias y piscícolas.

En la modelación se han considerado dos variedades de acuíferos: unicelular y autovalores. La categoría unicelular está indicada para las masas subterráneas de la periferia de la cuenca del Duero, las cuales se desmarcan del comportamiento homogéneo que presentan las masas subterráneas de la zona central de la cuenca y que se modelan a través del método de los autovalores.

Las masas relacionadas en la Tabla 2 se aglutinan dentro del denominado acuífero terciario central del Duero ya que se considera que presentan una interrelación basada, entre otras cuestiones, en una transferencia lateral de recursos, de modo que puede modelarse un acuífero global, definido por el método de autovalores, que representa las masas subterráneas del interior de la cuenca del Duero, y en el que cada una de los acuíferos caracterizados en el sistema se correspondería con una subzona que tiene asignados unos bombeos y unas recargas.

En el modelo único de la cuenca del Duero se puede efectuar la adecuada caracterización conjunta de las masas subterráneas pertenecientes al acuífero terciario central. En los modelos detallados debido a la falta de cohesión y de integridad territorial se pierde bastante información y a veces se opta por la modelación con un acuífero unicelular.

Código masa	Nombre de la masa
400006	VALDAVIA
400009	TIERRA DE CAMPOS
400010	CARRIÓN
400014	VILLADIEGO
400020	ALUVIALES DEL PISUERGA-ARLANZÓN
400025	PÁRAMO DE ASTUDILLO
400029	PÁRAMO DE ESGUEVA
400030	ARANDA DE DUERO
400031	VILLAFÁFILA
400032	PÁRAMO DE TOROZOS
400037	CUENCA DE ALMAZÁN
400038	TORDESILLAS
400039	ALUVIAL DEL DUERO: ARANDA-TORDESILLAS
400041	ALUVIAL DEL DUERO: TORDESILLAS-ZAMORA
400042	RIAZA
400043	PÁRAMO DE CUÉLLAR
400044	PÁRAMO DE CORCOS
400045	LOS ARENALES
400046	SEPÚLVEDA
400047	MEDINA DEL CAMPO
400048	TIERRA DEL VINO
400049	AYLLÓN
400052	SALAMANCA
400067	TERCIARIO DETRÍTICO BAJO LOS PÁRAMOS

Tabla 2. Masas subterráneas del acuífero terciario central.

El modelo SIMGÉS actúa por superposición. Las recargas netas proceden de los regadíos y el resto del flujo se completa con la interacción río-acuífero.

Una demanda se relaciona con el acuífero de dos modos, bien a través de la transferencia vertical de recursos que supone la infiltración del flujo de agua que ni se consume ni retorna al río, bien porque se está efectuando un bombeo, con lo que habría una detracción o merma del volumen de reservas del embalse subterráneo.

Un acuífero unicelular está conectado hidráulicamente con el sistema superficial a través de un coeficiente de desagüe. Así, todos los acuíferos unicelulares modelados están conectados con una o varias masas de agua superficial que, o aportan una parte del recurso necesario para compensar las detracciones de los bombeos, o reciben el excedente en el caso de que la recarga del regadío sea superior al bombeo asociado a la masa subterránea.

En lo que concierne al acuífero terciario central se ha observado que el tramo de río Duero entre Toro y San Román experimenta en la práctica una disminución del caudal no imputable a demandas consuntivas que incidan de modo directo; de esta manera, se asume que en esta zona se pierde un volumen de agua que compensa en parte el balance negativo que resulta entre los bombeos y la infiltración de los regadíos (en ausencia de la recarga debida a la lluvia).

Los acuíferos considerados en la modelación se compendian en la Tabla 3, indicándose la tipología y el modelo de simulación donde se han incluido. Se observa que algunos acuíferos aparecen en más de un modelo; esto se debe a la complejidad para representar la relación entre las masas superficiales, pertenecientes a varios sistemas de explotación diferentes, y el mundo subterráneo.

Masa subterránea	Tipo Acuífero	Modelo
Vilardevós-Laza	Unicelular	Esla
Verín	Unicelular	Esla
Sanabria	Unicelular	Esla
Aliste	Unicelular	Esla
Valle del Tera	Unicelular	Esla
La Maragatería	Unicelular	Esla
La Pola de Gordón	Unicelular	Esla
Terciario y Cuaternario del Tuerto-Esla y Raña del Órbigo	Unicelular	Esla
Terciario y Cuaternario del Tuerto-Esla	Unicelular	Esla
Aluvial del Órbigo	Unicelular	Esla
Villafáfila	Unicelular	Esla
La Maragatería y Raña de la Bañeza	Unicelular	Esla
Aluvial del Esla	Unicelular	Esla
Terciario y Cuaternario del Esla-Cea	Unicelular	Esla
Guardo	Unicelular	Esla
Tierra de Campos	Unicelular	Esla
Cervera de Pisuerga	Unicelular	Pisuerga
Castrojeriz	Unicelular	Pisuerga
Quintanilla-Peñahorada	Unicelular	Pisuerga
Sierra de la Demanda	Unicelular	Pisuerga
Arlanzón-Río Lobos	Unicelular	Pisuerga
Sierra de Cameros	Unicelular	Pisuerga
Sayago	Unicelular	Pisuerga
Carrión	Autovalores	Pisuerga
Valdavia	Autovalores	Pisuerga
Tierra de Campos	Autovalores	Pisuerga
Páramo de Torozos	Autovalores	Pisuerga
Aluviales Pisuerga-Arlanzón	Autovalores	Pisuerga
Páramo de Astudillo	Autovalores	Pisuerga
Tordesillas	Autovalores	Pisuerga
Páramo de Esgueva	Autovalores	Pisuerga
Aluvial del Duero	Autovalores	Pisuerga
Aranda de Duero	Autovalores	Pisuerga
Burgos	Autovalores	Pisuerga
Aluvial del Duero: Toro-Zamora	Autovalores	Pisuerga
Tierra del Vino	Autovalores	Pisuerga
Medina del Campo	Autovalores	Pisuerga
Aranda de Duero	Unicelular	Alto Duero
Araviana	Unicelular	Alto Duero
Arlanzón-Río Lobos	Unicelular	Alto Duero
Almazán Sur	Unicelular	Alto Duero
Moncayo	Unicelular	Alto Duero
Riaza	Unicelular	Alto Duero
Cabrejas-Soria	Unicelular	Alto Duero

Masa subterránea	Tipo Acuífero	Modelo
Cuenca de Almazán	Unicelular	Alto Duero
Páramo de Escalote	Unicelular	Alto Duero
Sierra de Cameros	Unicelular	Alto Duero
Páramo de Esgueva	Unicelular	Alto Duero
Páramo de Cuéllar	Unicelular	Alto Duero
Sepúlveda	Unicelular	Alto Duero
Ayllón	Unicelular	Alto Duero
Los Arenales	Unicelular	Alto Duero
Aluvial del Duero: Aranda-Tordesillas	Unicelular	Alto Duero
Cantimpalos	Unicelular	Alto Duero
Guadarrama-Somosierra	Unicelular	Alto Duero
Páramo de Corcos	Unicelular	Alto Duero
Cantimpalos	Unicelular	Cega-Eresma-Adaja
Guadarrama-Somosierra	Unicelular	Cega-Eresma-Adaja
Prádena	Unicelular	Cega-Eresma-Adaja
Segovia	Unicelular	Cega-Eresma-Adaja
Sierra de Ávila	Unicelular	Cega-Eresma-Adaja
Valle de Amblés	Unicelular	Cega-Eresma-Adaja
Tordesillas	Autovalores	Cega-Eresma-Adaja
Medina del Campo	Autovalores	Cega-Eresma-Adaja
Páramo de Cuéllar	Autovalores	Cega-Eresma-Adaja
Los Arenales	Autovalores	Cega-Eresma-Adaja
Ciudad Rodrigo	Unicelular	Tormes
La Fuente de San Esteban	Unicelular	Tormes
Las Batuecas	Unicelular	Tormes
Vitigudino	Unicelular	Tormes
Salamanca	Unicelular	Tormes
Valdecorneja	Unicelular	Tormes
Gredos	Unicelular	Tormes
Campo Charro	Unicelular	Tormes
Sayago	Unicelular	Tormes

Tabla 3. Acuíferos: denominación, tipología y modelo de simulación.

4.5.3. Aportaciones

Las aportaciones proceden del Inventario de recursos hídricos de la cuenca que amalgama los valores determinados por Simpa con aforos o entradas a embalse en aquellas zonas en las que se han observado discrepancias importantes.

En el apéndice de este anejo se compendian las series de aportaciones introducidas en el modelo de simulación para la evaluación de cada uno de los sistemas de explotación estudiados.

Cada columna de aportación comprende 792 registros mensuales que van desde octubre de 1940 hasta septiembre de 2006.

Como se aprecia en los mapas de las subcuencas de aportación, un sistema de explotación se subdivide en varias cuencas de aportación, facilitando así su introducción en el modelo.

Una cuenca de acumulación engloba una o varias subcuencas (definitorias de una masa superficial).

En la simulación no se introduce una aportación por masa. Resultaría un trabajo tedioso y se requiere cierta simplificación en el diseño; en la práctica se efectúa una agregación de las aportaciones de distintas masas, teniendo en cuenta en su agrupación factores de muy diferente índole. Así, se han formado subcuencas de mayor tamaño designadas con la denominación AN XXX y cuyo valor se calcula como combinación lineal de las masas consideradas en cada caso. Esta metodología se sigue para todos los sistemas de explotación.

En la modelación se contemplan dos periodos hidrológicos de análisis: la serie larga y la serie corta. La serie larga consta de 66 años hidrológicos comprendidos entre 1940/1941 y 2005/2006; sin embargo, la serie corta cuenta con 26 años desde 1980/1981 hasta 2005/2006.

Las series de aportaciones son idénticas para la situación actual, el horizonte 2015 y el horizonte 2027, mientras que para el escenario que representaría el año 2027 se plantea una disminución de la cuantía del 6% en el conjunto de la cuenca del Duero (según la IPH).

Una cuestión concerniente a la simulación es que las aportaciones que alimentan los modelos, y en particular cada sistema de explotación considerado, no coinciden con el total de aportación definida en las denominadas subzonas de explotación del Inventario de Recursos Hídricos de la Demarcación Hidrográfica del Duero.

En cada uno de los sistemas se explican las coincidencias y el porqué de la discrepancia entre valores, comentando la casuística que atañe a cada uno de ellos. Por ejemplo, en algunos casos, el sistema de explotación se ciñe a lo que es el propio río que le da nombre, como en el caso del Tormes, no reflejándose la parte fronteriza puesto que al ser un tema sumamente prolijo se deja para ser tratado en el modelo completo del Duero, donde se plasma la singularidad del tramo que hace frontera con Portugal.

De cualquier forma, el modelo global del Duero se estaría simulando con la aportación de la masa 200509, correspondiente al embalse de Pocinho.

En la presentación de las aportaciones habría que tener en cuenta dos aspectos, por un lado, aquellos sistemas que son autónomos y, por tanto, únicamente están influenciados por las aportaciones generadas en su subcuenca, y por otra parte, aquellos sistemas que además de la aportación generada en su subcuenca reciben aportaciones complementarias o excedentes de los sistemas vecinos.

Así, son sistemas aislados: Órbigo, Támega-Manzanas, Tera, Arlanza, Alto Duero, Cega-Eresma-Adaja, Tormes y Águeda.

Son sistemas vinculados a otros: Esla, Carrión, Pisuerga, Riaza y Bajo Duero.

4.5.4. Demandas consuntivas

Se contemplan las siguientes demandas consuntivas: agraria, urbana, industrial y acuícola. Esta última tendría un carácter cuasi no consuntivo ya que el retorno de agua al cauce no puede considerarse total.

El modelo funciona mes a mes, hecho que obliga a introducir valores mensuales en las demandas, conque éstas deben estar bien caracterizadas.

Las características comunes a toda demanda son las siguientes:

- Volumen mensual demandado
- Volumen anual demandado
- Coeficiente de retorno (explícito)
- Coeficiente de consumo (explícito)
- Coeficiente de infiltración (implícito; la suma de retorno, infiltración y consumo es igual a la unidad)
- Acuífero de recarga. Si la demanda se estructura únicamente en consumo y retorno superficial no es preciso definir un acuífero para las filtraciones.
- Acuífero de bombeo (para las demandas de origen subterráneo)

4.5.4.1. *Demandas agrarias*

Poseen la mayor cuantía en la cuenca del Duero. Si bien existe demanda a lo largo de todo el año, la mayor parte de las necesidades se concentraría entre los meses de abril y septiembre.

Hay dos distinciones fundamentales en función del origen del agua suministrada: superficial y subterránea.

4.5.4.2. *Demandas urbanas*

Incluyen el abastecimiento a poblaciones e industrias conectadas a al red municipal. La distribución mensual tiene en cuenta el efecto ocasionado por la estacionalidad de la población. De este modo, durante los meses de julio, agosto y septiembre se supone que se concentra el máximo consumo.

4.5.4.3. Demandas industriales

Engloba industrias que poseen captaciones o tomas directas de masas superficiales. No se han simulado aquellas demandas que tienen origen subterráneo.

Los aprovechamientos de índole industrial son muchos y muy difusos. Son escasas las instalaciones industriales que demanden una cantidad excesiva de agua, a excepción de las centrales térmicas que exigen volúmenes de agua sumamente significativos para la refrigeración, además de otros procesos, aunque luego no se destine toda al consumo y retorne una parte al cauce.

El reparto mensual de esta tipología de demandas se realiza, a falta de otras indicaciones, ateniéndose al número de días con que cuenta cada mes.

4.5.4.4. Demandas acuícolas

La modulación de la demanda se hace repartiendo el volumen de vertido anual en función del número de días de cada uno de los meses. Así, se está suponiendo que la detracción de agua es continua a lo largo de todo el año (ya sea año natural o hidrológico).

4.5.5. Retornos

Los retornos se consideran como una parte de la aportación detraída en un primer momento y que posteriormente se recupera para el balance hidrológico.

Para facilitar la presentación de resultados se asume en el diseño del grafo que cada demanda está vinculada a un único retorno, siendo, por tanto, una relación unívoca. Cada unidad de demanda tiene su propio retorno.

Las demandas consuntivas tienen asignado un retorno superficial, siendo su codificación en el modelo la siguiente.

RDA → Retorno de demanda agrícola.

RDU → Retorno de demanda urbana.

RDP → Retorno de demanda piscícola.

RDI → Retorno de demanda industrial.

Al acrónimo le seguirá un código numérico que identifica a la demanda en cuestión.

4.5.5.1. Cuantía del retorno

En las demandas urbanas e industriales se supone que el retorno representa un 20%, siguiendo el criterio de la IPH.

Caso aparte son las centrales térmicas cuyo volumen de retorno se especifica en el apartado correspondiente del sistema de explotación al que esté vinculada, aunque como orden de magnitud puede indicarse que es del orden del 60% en aquellas instalaciones que tienen un sistema de refrigeración en circuito cerrado.

En las piscifactorías, se considera un uso cuasi no consuntivo, siendo la cuantía de un 5%.

En las demandas agrarias el retorno superficial tiene en cuenta las pérdidas producidas en la red de transporte y de distribución.

4.5.5.2. Localización del retorno

Los retornos en las demandas consuntivas se representan mediante un elemento propio y distintivo en el modelo.

En las demandas no consuntivas (centrales hidroeléctricas) no es preciso utilizar ningún artificio puesto que el caudal detraído en un determinado punto del sistema se reintegra en su totalidad en otro punto del mismo, explicitándose tal circunstancia en el modelo por la distintiva grafía del símbolo de la central.

Los retornos de las piscifactorías se ubican en la masa donde se localiza el vertido.

Los retornos agrícolas son más complejos de definir. En la modelación, se asume que todo el retorno de una unidad de demanda agraria se concentra en una única masa o segmento de la misma, situado en un punto aguas abajo de donde se extiende la zona regable.

En la realidad los retornos de aguas superficiales ocurrirán de un modo difuso, comprendiendo toda el área de riego a través de una compleja red de acequias, caces, arroyos y flujo subsuperficial que acabará desembocando en su totalidad en una masa localizada al término de los regadíos evaluados.

Los retornos urbanos son aun, si cabe, más complejos de plasmar en la modelización. Hay que tener en cuenta que muchas de las unidades de demanda urbana son agrupaciones de muy diversas poblaciones, cada una de las cuales posee su propio vertido en una masa concreta o incluso en ríos que no están considerados como tal. Esto significa que una UDU podría contar con varios vertidos localizados en ríos muy diferentes, en masas distintas o en ríos que no son masa. Para solucionar esta cuestión se supone que todos los vertidos (o retornos) se concentrarán en una masa, en nuestro caso asociada a un arco del modelo, circunstancia perfectamente asumible desde un punto de vista hidrológico global.

Cuando se desee un balance local habría que proceder a un análisis exhaustivo de la zona objeto de estudio.

Los grandes núcleos urbanos de la DHD están bien caracterizados, aunque sus vertidos están localizados en puntos adscritos a masas perfectamente definidas en la modelación.

4.5.6. Centrales hidroeléctricas

En principio se dibujan en el esquema aquellas centrales hidroeléctricas que se hallan en explotación en la situación actual, habiendo excepciones según la dificultad que entrañe la representación de las masas.

En la simulación se van a considerar dos tipos de centrales, las fluyentes, cuya capacidad de gestión es reducida ya que se limitan a turbinar el agua que pasa por el arco del modelo hasta el caudal máximo, y las que operan en puntas, asociadas a un embalse que puede controlar los recursos que circulan por el río y que, por tanto, están sujetas a los vaivenes de la lámina de agua del embalse, por lo que la altura de turbinado es variable.

En muchos casos existen datos del titular sobre el rendimiento del equipo electromecánico. Cuando no existe ese dato, se supone que es 0,85. La justificación es la siguiente:

$$\eta_{\text{equipo}} = \eta_{\text{turbina}} \cdot \eta_{\text{generador}} \cdot \eta_{\text{transformador}}$$

Son habituales los siguientes datos (según la literatura *ad hoc*):

$$\eta_{\text{turbina}} = 0,9$$

$$\eta_{\text{generador}} = 0,96$$

$$\eta_{\text{transformador}} = 0,98$$

$$\eta_{\text{equipo}} = 0,9 \cdot 0,96 \cdot 0,98 = 0,8467 \approx 0,85$$

La hidrografía de la cuenca del Duero es sumamente densa y existen muchos aprovechamientos hidroeléctricos que se ubican en ríos de cabecera o arroyos que no están catalogados como masa, en los que prima el salto frente al caudal circulante. Y es sabido que resulta sumamente complejo plasmar en el esquema de simulación no sólo las masas sino el resto de la red fluvial, con el añadido de que las aportaciones están calculadas para el punto terminal de la masa. Así, por el momento no están consideradas todas las masas superficiales en el diseño de los grafos; esta circunstancia implica que no se faciliten resultados de algunas centrales en los balances.

Modelar todas las centrales hidroeléctricas exigiría un gran esfuerzo, porque habría que procurar que se estuviese turbinando un caudal similar a la aportación que realmente pasa por el punto de toma o derivación para que los resultados fuesen creíbles, tanto para evaluar la producción de energía como para comprobar si el caudal de concesión se ajusta a los recursos de la zona y la compatibilidad con otros usos.

En el modelo simplificado de la cuenca se procura agrupar centrales hidroeléctricas a tenor del menor número de arcos y masas simuladas.

El modelo tiende a turbinar más agua de la que se turbinan en la práctica. En el arco en que se apoya la central se produce cierto efecto embalse o de acumulación de caudal que no refleja las incidencias diarias. A fin de cuentas, el paso diario sería la escala de trabajo con la que se opera habitualmente. Además, existen condicionantes técnicos y de mercado que son difíciles de reproducir.

SIMGES calcula la producción de energía hidroeléctrica mediante un coeficiente energético cuyas unidades relacionan la producción con el producto del caudal por el salto. El valor inicial de este coeficiente es 0,0027222 pero se corrige multiplicándolo por el rendimiento global de la central, y es este resultado el que se introduce como parámetro de la central en el modelo.

4.5.7. Embalses

En el diseño del grafo aparecen como una suerte de nudos que enlazan los diferentes arcos simulados con la salvedad de que poseen capacidad de almacenamiento, hecho que permite su intervención en la gestión de la cuenca.

No todos los embalses incluidos en la modelación ejercen un efecto regulador, algunos son meros puntos de derivación. Para que realmente se pueda considerar regulador ha de tenerse presente la capacidad de almacenamiento, la aportación media que pasa por el punto de control y que, por tanto, es susceptible de ser almacenada, y los usos vinculados a la infraestructura.

Se procura que cada embalse regule la aportación generada en la cuenca que define para que los resultados de la modelación se ajusten a la realidad.

Podríamos hacer la siguiente clasificación funcional de los embalses:

- Aquellos cuya regulación evidencia una clara dependencia de la gestión consuntiva a la que se unen sueltas para producción.
- Hidroeléctricos, para la gestión hidroeléctrica almacenan energía y para conseguir salto interesa que la cota de la lámina de agua sea elevada, por lo que en algunos casos están siempre llenos.
- Los que son meros puntos de derivación o gestión meramente.

4.5.7.1. Parámetros de la simulación característicos de un embalse

En cada embalse se manejan los siguientes parámetros:

Curvas de embalse: cota-superficie y cota volumen. De este modo, se evalúa cómo desciende la lámina de agua y se analizan las pérdidas por evaporación. Característica de cada embalse.

Evaporación: tasa expresada en mm/mes y característica del embalse según la zona de la cuenca donde se ubique.

Volumen máximo: máxima capacidad del embalse con nivel máximo normal de embalse, esto es, la capacidad que se contempla durante la explotación ordinaria. En aquellos embalses que se contempla la posibilidad de laminación de avenidas, el resguardo que habría de respetarse se descuenta de la capacidad máxima.

Volumen objetivo: volumen esperable en el embalse. Normalmente se ha escogido el promedio del volumen final de mes de los últimos quince años (desde enero de 1991 hasta septiembre de 2006).

Volumen mínimo: la CHD en cada campaña determina unos volúmenes mínimos que habrían de dejarse al final del mes de septiembre. Estos varían cada año hidrológico pero en la modelación se consideran unos valores fijos. De hecho, se considera que a lo largo del año se mantiene ese valor mínimo. En la práctica se observa que el periodo problemático está comprendido entre julio y octubre, cuando existen sueltas muy superiores a las entradas naturales.

Volumen inicial de la simulación: Se suele poner un valor similar al promedio del mes septiembre del conjunto de años simulados.

4.5.7.2. Resguardos

Para cada año hidrológico la CHD fija unos resguardos mínimos en una serie de embalses de la cuenca con el objeto de laminar avenidas o hacer frente a los deshielos en aquellas zonas donde las innivaciones sean importantes. La traducción a los modelos de esto consiste en restarle al volumen máximo mensual el resguardo que se halla fijado en el mes considerado de modo que se está menguando la capacidad de almacenamiento de la infraestructura en determinados meses del año, estando el tope por debajo de la capacidad ordinaria en un régimen normal de explotación. Ese volumen de resguardo, aunque pudiera almacenarse temporalmente durante una avenida hasta el MNN o un nivel superior, en el cómputo global del mes figurará como suelta.

Normalmente los resguardos se observan desde diciembre hasta abril (ambos inclusive).

En la Tabla 4 se relacionan los embalses en los que se deja un resguardo así como el volumen resultante que hay que aplicar. Los datos están expresados en hm³.

Embalse	Mes	V _{máx}	Resguardo	Volumen aplicable
Riaño	diciembre	651	75	576
Riaño	enero	651	75	576
Riaño	febrero	651	80	571
Riaño	marzo	651	90	561
Riaño	abril	651	70	581
Barrios de Luna	diciembre	308	40	268
Barrios de Luna	enero	308	40	268
Barrios de Luna	febrero	308	40	268
Barrios de Luna	marzo	308	30	278
Barrios de Luna	abril	308	15	293
Porma	diciembre	317	40	277
Porma	enero	317	40	277
Porma	febrero	317	40	277
Porma	marzo	317	40	277
Porma	abril	317	30	287
Villameca	diciembre	20	5	15
Villameca	enero	20	5	15
Villameca	febrero	20	3	17
Villameca	marzo	20	1	19
Villameca	abril	20	1	19
Santa Teresa	diciembre	496	100	396
Santa Teresa	enero	496	100	396
Santa Teresa	febrero	496	100	396
Santa Teresa	marzo	496	60	436
Santa Teresa	abril	496	35	461
Águeda	diciembre	22,431	6	16,431
Águeda	enero	22,431	6	16,431
Águeda	febrero	22,431	6	16,431
Águeda	marzo	22,431	6	16,431
Águeda	abril	22,431	6	16,431
Iruña	diciembre	110	15	95
Iruña	enero	110	15	95
Iruña	febrero	110	15	95
Iruña	marzo	110	10	100
Iruña	abril	110	10	100
Castro de Las Cogotas	diciembre	58,6	20	38,6
Castro de Las Cogotas	enero	58,6	20	38,6
Castro de Las Cogotas	febrero	58,6	20	38,6
Castro de Las Cogotas	marzo	58,6	15	43,6
Castro de Las Cogotas	abril	58,6	10	48,6
Linares del Arroyo	diciembre	58,07	10	48,07
Linares del Arroyo	enero	58,07	10	48,07
Linares del Arroyo	febrero	58,07	7	51,07

Embalse	Mes	V _{máx}	Resguardo	Volumen aplicable
Linares del Arroyo	marzo	58,07	7	51,07
Linares del Arroyo	abril	58,07	5	53,07
Cuerda del Pozo	diciembre	229	50	179
Cuerda del Pozo	enero	229	50	179
Cuerda del Pozo	febrero	229	50	179
Cuerda del Pozo	marzo	229	35	194
Cuerda del Pozo	abril	229	20	209
Compuerto	diciembre	94,919	25,5	69,419
Compuerto	enero	94,919	25	69,919
Compuerto	febrero	94,919	20	74,919
Compuerto	marzo	94,919	10	84,919
Compuerto	abril	94,919	2	92,419
Requejada	diciembre	64,73	15	49,73
Requejada	enero	64,73	15	49,73
Requejada	febrero	64,73	15	49,73
Requejada	marzo	64,73	10	54,73
Requejada	abril	64,73	5	59,73
Cervera	diciembre	10,261	5	5,261
Cervera	enero	10,261	5	5,261
Cervera	febrero	10,261	5	5,261
Cervera	marzo	10,261	4	6,261
Cervera	abril	10,261	2,5	7,761
Aguilar	diciembre	247,2	50	197,2
Aguilar	enero	247,2	50	197,2
Aguilar	febrero	247,2	50	197,2
Aguilar	marzo	247,2	30	217,2
Aguilar	abril	247,2	20	227,2
Castrovido (2027)	diciembre	82	12	70
Castrovido (2027)	enero	82	12	70
Castrovido (2027)	febrero	82	12	70
Castrovido (2027)	marzo	82	12	70
Castrovido (2027)	abril	82	8	74
Úzquiza	diciembre	74,627	20	54,627
Úzquiza	enero	74,627	20	54,627
Úzquiza	febrero	74,627	20	54,627
Úzquiza	marzo	74,627	10	64,627
Úzquiza	abril	74,627	5	69,627
Camporredondo	diciembre	69,788	0	69,788
Camporredondo	enero	69,788	0	69,788
Camporredondo	febrero	69,788	0	69,788
Camporredondo	marzo	69,788	0	69,788
Camporredondo	abril	69,788	0	69,788
Agavanzal	noviembre	35,88	6,47	29,41
Agavanzal	diciembre	35,88	6,47	29,41
Agavanzal	enero	35,88	6,47	29,41
Agavanzal	febrero	35,88	6,47	29,41
Agavanzal	marzo	35,88	6,47	29,41
Cernadilla	octubre	255,54	14	241,53
Cernadilla	noviembre	255,54	14	241,53
Cernadilla	diciembre	255,54	14	241,53
Cernadilla	enero	255,54	14	241,53
Cernadilla	febrero	255,54	14	241,53
Cernadilla	marzo	255,54	14	241,53
Cernadilla	abril	255,54	14	241,53

Tabla 4. Resguardos y volúmenes resultantes en los embalses.

4.5.8. Canales

Estas infraestructuras presentan un funcionamiento similar al de una conducción tipo 1, es decir, un río o masa de agua, con la salvedad de que tienen impuesto un caudal máximo que se ajusta a la capacidad de

diseño de la conducción que se considere en cada caso. Conviene indicar que el hecho de que se asigne un caudal máximo a una conducción no implica que se derive esa cantidad todos los meses sino que esa cuestión está en función de las necesidades mensuales de las demandas.


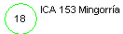



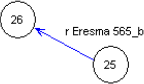
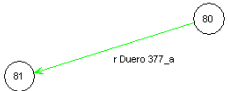
La capacidad máxima proporciona una idea de las restricciones que se han impuesto; si el valor asignado es siempre idéntico significa que no hay ninguna limitación, luego funcionará según la dinámica que impongan los usos consuntivos asociados.

En principio, el periodo de operación de los canales se ajusta a los usos que estén vinculados al mismo. Así, los canales de las zonas regables estarían funcionando durante la campaña de riego. Sin embargo, hay canales muy singulares como es el caso del Canal de Castilla que llevaría agua durante todo el año.

La inclusión de demasiadas conducciones complicaría en exceso la simulación y las tomas de las demandas, debido a su particular configuración interna, ya se están comportando como una conducción de transporte.

4.6. Resumen de los iconos usados en la modelación

En la Tabla 5 se reproduce la simbología empleada en el diseño del grafo. Los colores y formas intentan ser fiel reflejo de lo que con posterioridad aparece en cada esquema. La búsqueda de un criterio común en la simbología ayuda a identificar los diferentes elementos que conforman un modelo.

Símbolo	Significado
	Nudo
	ICA
	Embalse
	Aportación Natural
	Vertido
	Tramo de río
	Tramo de río relacionado con los acuíferos

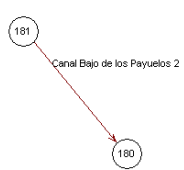
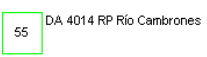
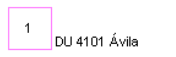






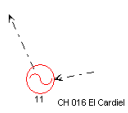
Símbolo	Significado
	Canal
	UDA
	UDU
	UDI
	UDP
	Retorno demanda
	Infiltración lluvia
	Tramo ficticio
	Acuífero
	Central hidroeléctrica

Tabla 5. Iconos empleados en el diseño del grafo.

4.7. Plan especial de sequías

El Plan Especial de Sequías (PES) se redacta al amparo de la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional, que establece en su artículo 27 sobre gestión de sequías, que los Organismos de Cuenca elaboren planes especiales de actuación en situaciones de alerta y eventual sequía en el ámbito de sus marcos territoriales, como queda reflejado en los puntos 1 y 2 de la citada ley.

El Objetivo General del PES es minimizar los aspectos ambientales, económicos y sociales de eventuales situaciones de sequía en la cuenca del Duero.

Desde el punto de vista operativo, el establecimiento de indicadores que detecten los distintos niveles de sequía con anticipación suficiente para actuar según las previsiones es uno de los puntos básicos del Plan Especial de Sequías en la Cuenca del Duero.

Se ha pretendido tener en cuenta el efecto del PES sobre los modelos de gestión de la cuenca mediante la aplicación de reglas de operación aunque el resultado ha sido irregular puesto que en algunas zonas se conseguía un incremento de los déficit en el suministro a las demandas primando el flujo de agua a través del río o el almacenamiento en el embalse, y generando problemas en lugares donde no los había o incrementándolos.

Dentro de la descripción de cada sistema de explotación, en determinados puntos del mismo, se ha efectuado una comparativa entre el caudal circulante y el recomendado en caso de sequía con el fin de observar la existencia de algún tipo de incidencia significativa.