

# Caudales ecológicos: conceptos básicos, métodos de cálculo y nuevas interpretaciones

FERNANDO MAGDALENO MAS (\*)

**RESUMEN** Los mecanismos de cálculo y establecimiento de caudales ecológicos y regímenes de caudales ambientales vienen experimentando un rápido desarrollo en los últimos años, en consonancia con el aumento en el conocimiento de las variables para las que se definen. La aprobación de nuevos marcos normativos en la planificación hidrológica y la necesidad de integrar todas estas consideraciones técnicas en la gestión moderna de los recursos hídricos hacen necesarios análisis detallados de la situación actual de estos aspectos. En este artículo se profundiza, a partir de los conceptos más clásicos existentes en este ámbito, en los nuevos métodos e interpretaciones que pueden dominar este campo en los próximos años.

## ENVIRONMENTAL FLOW REQUIREMENTS: BASIC CONCEPTS, METHODS AND NEW APPROACHES

**ABSTRACT** *Environmental flow assessments have developed very fast in recent years, in accordance with the increasing knowledge of the main variables for which they are defined. The introduction of new legal frameworks in the hydrological planning and the necessary integration of all these technical aspects in the modern management of the water resources, appeal for detailed analyses of the present situation of these elements. This paper goes deeply, from the most classic concepts, into the new methods, methodologies and approaches which may be dominant in this area in coming years.*

**Palabras clave:** Caudales ecológicos, Régimen ambiental de caudales, Gestión de recursos hídricos, Sistemas fluviales, Estado ecológico, Regulación.

## 1. INTRODUCCIÓN

El establecimiento de un régimen ambiental de caudales es, en la actualidad, una herramienta prácticamente imprescindible en la gestión de las cuencas hidrográficas. El número de infraestructuras hidráulicas construidas ha sufrido un enorme incremento en las últimas décadas, como respuesta a la demanda creciente de recursos hídricos originada por el desarrollo agrícola, industrial y urbano. Se estima que a nivel mundial existen más de 45.000 grandes presas (Gupta, 1998), de las cuales unas 1.200 se encuentran en España, valor que sitúa a nuestro país entre los cinco países del mundo con mayor capacidad de embalse (unos 56.000 hm<sup>3</sup>).

El agua transportada por los ríos presenta una doble dimensión: como recurso dentro de la reserva hídrica del país o como componente fundamental del sistema fluvial. El principal objetivo de una correcta regulación sería el mantenimiento de la funcionalidad del río, bajo perspectivas ambientales, económicas y sociales. El valor de conservación de los ecosistemas fluviales está cada día más reconocido en la literatura especializada, dada la gran diversidad biológica que albergan. A su función como corredores biológicos capa-

ces de conectar ecosistemas fluviales y terrestres se une su función de conexión del medio hídrico y terrestre, con la importancia que este hecho tiene desde el punto de vista de la transferencia biológica y energética (Cachón, 2003), pero no es menos importante el valor social, económico y cultural que han adquirido estos sistemas para la sociedad, ya sea como motor económico a partir de su vocación de espacio recreativo y lúdico, o como fuente de beneficios paisajísticos, estéticos y culturales, de más difícil valoración, pero de enorme e insustituible servicio a la sociedad.

Por todo ello, se justifica plenamente la necesidad de adoptar regímenes de caudales ambientales en aquellos ríos que han sido regulados mediante diversas infraestructuras hidráulicas y que pueden ver en peligro los sistemas naturales que albergan y por ende el conjunto de valores de diversa índole vinculados a ellos.

## 2. EL CAUDAL ECOLÓGICO Y EL RÉGIMEN AMBIENTAL DE CAUDALES

### 2.1. DEFINICIÓN Y CONCEPTOS BÁSICOS

Un caudal circulante por un cauce puede ser considerado como ecológico si asegura el mantenimiento del patrimonio hidrobiológico y sociocultural del medio fluvial, compatible con la necesidad de abastecimiento doméstico y de suministro agrícola e industrial. Además, deberá ser representativo de la variabilidad natural del régimen de caudales del río y habrá

(\*) Ingeniero de Montes. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX. Ministerio de Fomento.

de contemplar el correcto funcionamiento de las diversas componentes asociadas al ecosistema fluvial, entre las que cabe destacar la flora y fauna propias del mismo, la calidad físico-química de las aguas superficiales y subterráneas, el dinámico equilibrio geomorfológico del sistema o el conjunto de valores sociales, económicos, culturales y paisajísticos del río. En este sentido, el referido caudal ecológico deberá estar acompañado de un conjunto de criterios e indicadores que constituyan programas de vigilancia y seguimiento de los requerimientos básicos definidos con anterioridad.

La determinación de un caudal ecológico requiere la adopción de diferentes objetivos y escenarios que ayuden a los gestores a decidir sobre el umbral mínimo requerido para el correcto funcionamiento del sistema (Dyson *et al.*, 2003). Ante el gran número de procesos integrados en el medio fluvial, se requiere la intervención de equipos multidisciplinarios y de representantes de los sectores implicados en su gestión, con el fin de consensuar un régimen ambiental de caudales que sea comprendido y asumido por todos ellos, y, por tanto y en último término, por el conjunto de la sociedad (King *et al.*, 1998).

Junto al término *caudal ecológico* han venido apareciendo diversos conceptos asociados, que definen un conjunto de términos que se pueden agrupar bajo el nombre genérico de caudales ambientales. La literatura reconoce, entre los más importantes, a los siguientes:

- Caudal de mantenimiento: se trata de un caudal calculado sobre el objetivo de la conservación de los valores bióticos del ecosistema fluvial. La adopción de estos caudales de mantenimiento responde a la necesidad de fijar un verdadero régimen completo de caudales, capaz de reproducir de la mejor forma posible la variabilidad temporal más probable y de permitir, en la mayor parte de los años, la reproducción exitosa de los seres vivos que integran el ecosistema.
- Caudal mínimo: este término hace referencia a un caudal capaz de mantener alguna de las funciones básicas del ecosistema fluvial. En origen (en EE.UU.) suponía una limitación a la extracción de agua durante la temporada seca, y puede ser prácticamente insignificante en zonas áridas y semi-áridas. No está necesariamente asociado a criterios científicos.
- Caudal de acondicionamiento: se trata de un caudal complementario al caudal mínimo o de mantenimiento, para una finalidad concreta, ajena a la conservación de valores bióticos del ecosistema fluvial y referida a aspectos abióticos (dilución, paisaje, usos recreativos, etc.).
- Caudal de sequía: se define como un caudal muy reducido, propio de años secos, pero suficiente para mantener a las especies en un ecosistema, sin permitir necesariamente su reproducción.
- Caudal generador (*bankfull flow*): es el que genera la morfología del cauce y se origina a partir de una cierta avenida con un periodo de recurrencia (variable según los distintos autores) que se obtiene al estudiar la serie de aportaciones del río.
- Caudal de limpieza (*flushing flow*): es el caudal que mantiene las características específicas del sustrato, previniendo la invasión de la vegetación en el cauce y removiendo la fracción más fina de partículas orgánicas e inorgánicas.
- Caudal máximo: es el mayor caudal que debe circular por el tramo de río regulado y que no debe ser superado al generar los caudales de mantenimiento, salvo en las grandes avenidas naturales.

A menudo aparecen también otros términos como volumen mínimo, demanda medioambiental o reserva mínima, que hacen referencia también al concepto de fondo del caudal ecológico, pero que se expresan en unidades de volumen, y que pueden tener connotaciones distintas según el caso específico en que se utilicen.

## 2.2. LA BASE LEGAL

- El antecedente normativo más directamente referido a los caudales ecológicos se encuentra en la Ley de pesca fluvial de 20 de febrero de 1942. En ella se recoge el concepto de caudal mínimo para obligar a los concesionarios de aprovechamientos hidráulicos a mantener determinados caudales para facilitar el paso de los peces. Esta Ley de pesca fluvial se encuentra aún vigente en la actualidad y tiene un perfil complementario en ausencia de legislación específica en las Comunidades Autónomas, si bien no se ha constituido como un marco normativo de referencia. Posteriormente, el Reglamento de Policía de Aguas y sus Cauces, de 1958, no hacía referencia alguna a esta obligación por parte de los concesionarios de los embalses, centrándose más en la regulación de los vertidos de aguas residuales.
- La Ley de Aguas de 1985 es la que estableció un marco innovador en la política de aguas española en general y en la delimitación e introducción de cuestiones ambientales en particular. La Ley de Aguas no incluye el concepto de caudal mínimo o ecológico, pero incorpora como elemento necesario para su consecución la planificación hidrológica, bajo su objetivo general de conseguir el buen estado ecológico de los recursos. El citado concepto aparece por primera vez en el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (Real Decreto 849/1986, de 11 de abril). En la Ley, los caudales ecológicos se establecen como restricciones o limitaciones a los sistemas de explotación. Estas regulaciones se incorporan posteriormente a la Ley de Aguas, en el texto refundido de la misma que es aprobado a través de la Ley 46/1999, de 13 de diciembre, y Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio. En su art. 59.5 se dispone asimismo que "(...) Los caudales ecológicos se fijarán en los Planes Hidrológicos de Cuenca. Para su establecimiento, los organismos realizarán estudios específicos para cada tramo de río".
- Los Planes Hidrológicos de Cuenca (PHC) tienen reservado, en el marco legal español y con carácter exclusivo, la gestión de los recursos hídricos en su totalidad. Por ello, ninguna otra administración puede fijar los caudales mínimos o regímenes de caudales ambientales, como han establecido claramente diversas sentencias del Tribunal Constitucional. No obstante, se apunta que se deben buscar vías de consenso y cooperación entre las distintas Administraciones a través de los PHC, por lo que el legislador autonómico podrá establecer mecanismos que permitan esta colaboración. Por otra parte, se reconoce que éste podrá, de forma unilateral, adoptar medidas de protección complementarias de las que corresponde establecer a los organismos de cuenca (Herráez, 1999).
- La Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional (PHN), incluía también distintas disposiciones en torno a los caudales ecológicos. En primer lugar (art. 3f) establece el concepto de "reservas hidrológicas por motivos ambientales". Los caudales ecológicos, al ser una componente sustraída de la posibilidad de aprovechamiento concesional, pueden ser considerados como

parte de estas reservas ambientales. Sin embargo, es el art. 26 de la Ley el que establece en toda su dimensión el concepto de caudal ecológico, al disponer lo siguiente: "A los efectos de la evaluación de disponibilidades hídricas, los caudales ambientales que se fijan en los Planes Hidrológicos de cuenca tendrán la consideración de una limitación previa a los flujos del sistema de explotación, que operará con carácter preferente a los usos contemplados en el sistema. Para su establecimiento, los Organismos de cuenca realizarán estudios específicos para cada tramo de río, teniendo en cuenta la dinámica de los ecosistemas y las condiciones mínimas de su biocenosis. Las disponibilidades obtenidas en estas condiciones son las que pueden, en su caso, ser objeto de asignación y reserva para los usos existentes y previsibles. (...) Los caudales ambientales tendrán la consideración de objetivos a satisfacer de forma coordinada en los sistemas de explotación y con la única preferencia del abastecimiento a poblaciones". El articulado también cubre la indeterminación que pudiera derivarse de la ausencia de referencias claras a este respecto en las concesiones otorgadas por la Administración.

- El Libro Blanco del Agua, publicado en septiembre de 2000, establece en primer lugar las connotaciones terminológicas relacionadas con algunos de los conceptos previamente analizados. Así, delimita el uso del término *caudal ecológico* a los casos en los que se pretenda recuperar las condiciones primigenias de biodiversidad, especies y ecosistemas anteriores a la detracción de caudales del medio. Si se intenta preservar las condiciones ambientales actuales, resultado de las actuaciones llevadas a cabo a lo largo de la historia, el texto advierte que un término más adecuado podría ser *caudal de mantenimiento*. También apunta la existencia de otros términos en algunos textos, como *caudal reservado*, fracción del natural que hay que preservar para un fin determinado o *caudal recomendado o regulado*, aludiendo a unos caudales establecidos como consecuencia de alguna regularización de las condiciones naturales del flujo, etc.

Asimismo, insiste en la necesidad de identificar unos caudales mínimos "que mantengan las poblaciones naturales del río y sus valores ecológicos, de tal modo que no puedan experimentar una disminución de su cuantía sin que ello implique una pérdida marcada de los mismos (...) y que tengan un carácter de restricción o limitación externa al propio sistema de utilización del agua y con un carácter previo y superior". En este sentido, el Libro Blanco del Agua sigue la línea marcada por el Consejo Nacional del Agua en su Informe sobre la propuesta de los Planes Hidrológicos de Cuenca, de abril de 1998. Sin embargo, el Libro Blanco recuerda que pese al avance de la investigación en torno a los efectos de la regulación de los caudales, es manifiesto el gran desconocimiento científico existente, en especial sobre los requerimientos de muchas especies ibéricas, de las que se carece incluso de datos cuantitativos (distribución, densidades, etc.). Por ello, como primer paso para el conocimiento de los ríos ibéricos, propone su caracterización y sistematización por medio de descriptores de distintas tipologías (hidrológicos, hidráulicos, ecológicos, etc.).

- La Directiva 2000/60/CE, de 23 de octubre de 2000, también conocida como Directiva Marco de Aguas, establece, como es sabido, un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.

En el art. 4 de la Directiva aparecen los objetivos medioambientales que deben cumplir los Planes Hidrológicos

de Cuenca (denominados Planes de Gestión de Cuenca en el resto de la Unión). Entre ellos, se fija que para las aguas superficiales "los Estados miembros habrán de proteger, mejorar y regenerar todas las masas de agua superficial (...) con objeto de alcanzar un buen estado de las aguas superficiales". En el mismo artículo se dispone que "los Estados miembros protegerán y mejorarán todas las masas de agua artificiales y muy modificadas, con objeto de lograr un buen potencial ecológico y un buen estado químico de las aguas superficiales". Con tal fin, establece programas de medidas básicas y complementarias (descritos en el anexo V de la Directiva), que deberán incluirse en los PHC. La Directiva otorga una especial importancia al adecuado establecimiento de unas condiciones de régimen hidrológico en la consecución del buen estado ecológico de los ríos. Es decir, apoya la definición de regímenes de caudales ambientales en los ríos sometidos a regulación hidrológica para cumplir los obligados objetivos ambientales de la Directiva.

- España es signataria, por otra parte, de diferentes acuerdos, programas y convenios internacionales referidos o enlazados con esta materia. Estos convenios establecen un marco legal base sobre el que se tienen que sustentar la adopción de medidas y programas capaces de fijar regímenes de caudales ambientales, que no pongan en peligro la supervivencia de los ecosistemas fluviales ni los distintos valores socioeconómicos, culturales y ambientales asociados a ellos. Entre ellos, cabe destacar el *Convenio para la Conservación de la Diversidad Biológica* (Río de Janeiro, 5 de junio de 1992), el *Convenio de Ramsar, o Convención relativa a los Humedales de Importancia Internacional especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas* (Ramsar, Irán, 2 de febrero de 1971), el programa *Man and the Biosphere* (MAB), iniciado en 1971 por la UNESCO, la *Declaración de Dublín* (1992), sobre el agua y el desarrollo sostenible, el *Convenio de Bonn* (1979), relativo a la conservación de especies migratorias o la *Convención de Helsinki* (1995) para la protección y uso de cursos de agua trans-fronterizos y lagos internacionales.

También son de aconsejada consulta los principales acuerdos internacionales sobre protección de los derechos sociales y culturales, dada la especial vinculación de los regímenes de caudales ambientales con el armónico desarrollo cultural de las poblaciones fuertemente vinculadas al recurso agua. En este ámbito, el tratado fundamental posiblemente sea la *Convención sobre la protección del legado cultural y natural mundial* (*World Heritage Convention*, París, 1972), que obliga a proteger de forma rigurosa los lugares y recursos de gran interés mundial, entre los que se cuentan un buen número de cursos y masas de agua.

- Finalmente, es importante hacer mención al R.D. Legislativo 1302/1986 de 28 de junio de Evaluación de Impacto Ambiental, y a la Ley 6/2001 de 8 de mayo de Modificación del R.D. Legislativo 1302/1986, así como al R.D. 1131/1988, de 30 de septiembre de 1988, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución del R.D. Legislativo 1302/1986. Estas disposiciones legales refuerzan la necesidad de contar con estudios de impacto, entre otros, de las grandes infraestructuras hidráulicas. Un régimen de caudales ambientales puede ser entendido como una medida restrictiva en la actividad de estas infraestructuras, por lo que se circunscribe al radio de acción de estos marcos normativos.

### 3. MÉTODOS DE CÁLCULO DEL RÉGIMEN DE CAUDALES AMBIENTALES

Los primeros estudios relacionados con la definición e introducción de caudales ecológicos, en ríos sujetos a regulaciones, se remontan a mediados del siglo pasado. Estas herramientas de gestión surgieron en aquel tiempo en Norteamérica con el objetivo de determinar los caudales necesarios para mantener las condiciones necesarias para la supervivencia de especies acuáticas de interés deportivo o comercial. A partir de los años 70, se produjo una evolución progresiva de las metodologías de cálculo de los caudales ecológicos en los sistemas fluviales, desde estas aproximaciones basadas en un objetivo único y específico, hasta interpretaciones más amplias. La utilización de un objetivo básico de conservación de determinadas poblaciones piscícolas solía estar asociada a la defensa de poblaciones de salmónidos, bajo la hipótesis de que la descarga de caudales capaces de asegurar la pervivencia de las especies objetivo aseguraba también en último término el mantenimiento del ecosistema fluvial en su conjunto. La evolución hacia interpretaciones y metodologías holísticas se inició sin embargo a comienzo de los años 90, incluyendo como objetivos básicos diversos conjuntos de componentes del medio fluvial (Tharme, 1996; King, 1999).

El cálculo de los caudales ecológicos necesarios para la consecución de un objetivo determinado puede ser llevado a cabo siguiendo una de las siguientes orientaciones (Arthington *et al.*, 1998):

- *ascendente*, cuando el régimen es calculado a partir de los caudales específicamente necesarios para un determinado propósito;
- *descendente*, cuando el régimen es calculado a partir de las máximas abstracciones posibles, a partir del régimen natural.

La aproximación ascendente es la más común, y su bondad depende tanto de la capacidad de los técnicos que intervienen en su formulación, como de la cantidad y calidad de información existente sobre las variables básicas en la definición del régimen de caudales. Un mayor flujo de información conduce invariablemente al cálculo de regímenes más parecidos al régimen natural del río.

En cualquier caso, la aproximación más integradora y completa sería la ascendente-descendente, en la que un régimen de caudales ambientales es definido inicialmente a partir de una interpretación ascendente, pero posteriormente comprobado y analizado mediante un proceso descendente, de tal forma que se puedan concretar determinados objetivos sin renunciar a una explotación suficientemente sostenible de los recursos hídricos en cuestión.

Una buena estructura metodológica en el cálculo del régimen de caudales ambientales sería aquella que incluyera aproximaciones multidisciplinarias a la materia; que fuera de aplicación tanto en ríos regulados como en ríos no regulados; que pudiera ser aplicada a distintas escalas en función de los flujos de información existentes y el grado de precisión requerido; que incorporara la opinión de los distintos agentes sociales implicados y que tuviera en cuenta todas las componentes del medio fluvial. Además, debería permitir a sus usuarios retro-alimentar el proceso en cualquier momento, a partir de la introducción de nuevos agentes o de nuevos campos de información. Esta estructura ideal es a la que apuntan las últimas tendencias en este ámbito, si bien se trata evidentemente de un conjunto de condiciones de las que frecuentemente es muy difícil disponer. De cualquier forma, las futuras investigaciones y esfuerzos en este campo deberían tratar de incorporar todos estos aspectos, para conseguir que el cálculo de los régi-

menes de caudales ambientales fuera lo más cercano posible a las características reales de cada sistema.

Mientras, los distintos métodos existentes y utilizados en los últimos años se pueden agrupar de forma general bajo cuatro enfoques:

- métodos hidrológicos;
- métodos hidráulicos;
- métodos de simulación de hábitat;
- métodos holísticos.

Existen, no obstante, algunos métodos de carácter muy específico, que no pueden agruparse bajo ninguna de estas categorías, de los que también se destacarán algunos aspectos a lo largo del texto.

#### 3.1. MÉTODOS HIDROLÓGICOS

En estos métodos, el caudal ecológico se deduce a partir de datos hidrológicos tratados mediante diversos mecanismos (caudales clasificados, porcentajes del caudal medio, análisis de series temporales, etc.). Pueden incorporar diversas fórmulas e índices hidrológicos, variables propias de la cuenca, o consideraciones hidráulicas, biológicas y/o geomorfológicas. En todo caso, sólo requieren ciertos conocimientos hidro-ecológicos. Los índices utilizados se eligen a partir de una combinación de análisis estadísticos y observaciones directas en ríos de similares condiciones hidrológicas y/o ecológicas.

- **Método NGPRP:** Este método se basa en la descripción de las condiciones hidrológicas de cada mes a partir de registros foronómicos (*Northern Great Plains Resource Program* o NGPRP, 1974). Las descargas medias mensuales son analizadas para estudiar la temporalidad de los registros. Los caudales ecológicos se calculan como los caudales que son igualados o superados el 90% del tiempo, una vez descartados los caudales extremos correspondientes a periodos secos y húmedos. El régimen de caudales ambientales final se obtiene como la serie de caudales ecológicos para cada mes.

- **Método de Hoppe:** Está basado en curvas de duración de caudales y en los requerimientos biológicos de las poblaciones piscícolas. Supone una de las primeras etapas en el desarrollo y reconocimiento de las relaciones entre los percentiles de una curva de duración de caudales y distintas condiciones favorables para la supervivencia de determinadas comunidades biológicas. El método establece tres niveles de caudales importantes para las poblaciones piscícolas, según tres objetivos básicos (alimento y refugio, reproducción y regeneración del cauce), que define como caudales que son igualados o superados durante un periodo de tiempo determinado, y que fija en los percentiles Q17, Q40 y Q80, respectivamente, para regeneración del cauce, reproducción y alimento y refugio. Como registro base de caudales, requiere series de caudales diarios de suficiente longitud temporal (unos 20 años como mínimo).

- **Método 7Q2:** Se trata de uno de los métodos hidrológicos más antiguos. Se ha aplicado básicamente en el sur de los Estados Unidos. El caudal ecológico es el valor correspondiente al caudal mínimo medio de siete días consecutivos, para un periodo de retorno de dos años. Existen algunos métodos de gran similitud a éste. Entre ellos, cabe destacar el método 7Q10, que utiliza el caudal mínimo medio de siete días consecutivos para un periodo de retorno de diez años; y los métodos 50% y 70% del 7Q10, sobre una abstracción máxima del 50% y 30%, respectivamente, del caudal calculado a partir del 7Q10.

– **Método ABF (Aquatic Base Flow) o método NEFM:**

Se ha usado básicamente en los proyectos relacionados con la generación de energía hidroeléctrica (*New England Flow Method*). El caudal ecológico se calcula como la media aritmética de los valores de la mediana (0,5 cfs), calculada para los caudales medios diarios del mes de agosto, de cada año de la serie considerada. En algunos casos se ha empleado también el valor más bajo de la mediana de caudales, en el mes de reproducción de las poblaciones piscícolas, aunque es un procedimiento mucho menos común. Existen también algunas alternativas al método, usando como criterio 0,6 cfs y 0,3 cfs (*median monthly flow*).

– **Métodos basados en el Q90:** El Q90 es utilizado de forma directa, en algunas ocasiones, como el caudal que cumple en sí ciertos requerimientos ambientales. Sin embargo, son más comunes en la literatura los métodos que fijan posibles porcentajes de uso a partir de este caudal.

El *método 10% del Q90* es un método basado en el cálculo del 10% del caudal con un 90% de probabilidad de ser igualado o superado. El caudal ecológico se obtiene fijando una abstracción máxima del 90% del caudal de referencia, cuando éste es el Q90. Existen referencias de otros métodos basados en el Q90, tales como el *método 5-20% del Q90*, que establece un intervalo de caudal ecológico, entre un 5 y un 20% del caudal que tiene un 90% de probabilidades de ser igualado o superado, y el *método 20% del Q90*, que define una abstracción máxima del 80% del caudal Q90. También existen algunas referencias al uso del Q95 y del Q96.

– **Métodos basados en el caudal medio anual y en los caudales medios mensuales:** Otros métodos definen el caudal ecológico de un río de forma directa como un porcentaje del caudal medio anual. Entre ellos, los más destacados son el *método 10% del QMA* (caudal medio anual), el *método 25% del QMA* y el *método 30% del QMA*. También cabe destacar la existencia de un método basado en los caudales medios mensuales, conocido como *método del 30% del caudal medio mensual*, que utiliza este porcentaje para definir el caudal ecológico preciso en cada mes del año.

– **Otros métodos:** Otros métodos citados en la literatura, de los que existen sin embargo escasas menciones en lo que respecta a sus aplicaciones prácticas y resultados, son los siguientes:

En primer lugar, los *métodos Q<sub>347</sub> y Q<sub>355</sub>*. El primero de ellos es la base del conocido como *método suizo o de Mathey*, en el que se plantea un algoritmo basado en el caudal igualado o superado durante 347 días al año.

El *método de Robinson* se basa en ecuaciones dependientes de los caudales medios mensuales, mediana de los caudales y caudales mínimos y en las superficies de las cuencas drenantes, para definir unos caudales adecuados para la consecución de unas determinadas poblaciones piscícolas.

El *método de Utah* propone dividir el año en dos periodos y utilizar las medias aritméticas de los valores más bajos de caudales medios mensuales para cada mes dentro de cada uno de los dos periodos.

Finalmente, el *método RVA (Range of Variability Approach)* propone que, a partir de series de caudales medios diarios, se calcule una serie de indicadores de alteración hidrológica predefinidos, decidiéndose, para cada uno, cuál debe ser el objetivo en condiciones de regulación, así como las reglas para alcanzarlo.

– **El método QBM (Caudal Básico de Mantenimiento):** El método del Caudal Básico de Mantenimiento es en la actualidad uno de los más difundidos en España. Se puede considerar que este método es pionero en España, y de los primeros a nivel internacional, en proponer un régimen temporal variado de caudales mínimos, así como en introducir, dentro de ese mismo régimen, una propuesta de cálculo y aplicación de caudales generadores, caudales máximos y una limitación gradual de las fluctuaciones artificiales del caudal, todo ello bajo premisas específicas para cada río o tramo (Palau et al., 1998).

– **El Método B.M. (Biodiversity Method) o Método Vasco:** Este método hace uso de la biodiversidad, como variable integrativa del funcionamiento del ecosistema fluvial (G. de Bikuña, 1997). Los distintos caudales ecológicos determinados mediante el método BM se basan en el criterio de que la detracción de flujo en el periodo de menor caudal circulante por aportaciones naturales (estiaje), no provoque la extinción de especies de invertebrados bentónicos, viéndose afectadas las poblaciones locales únicamente en grado tolerable; y en ningún caso se manifieste una afección al conjunto de poblaciones de las distintas especies que habitan en toda la cuenca hidrográfica. Posteriormente, el método ha sido desarrollado con mayor extensión a través de la metodología CAHN.

### 3.2. MÉTODOS HIDRÁULICOS

Los conocidos como métodos hidráulicos emplean los cambios ocurridos en variables hidráulicas sencillas (por ejemplo, perímetro mojado, calado máximo y velocidad media), medidas, generalmente, en una o varias secciones, a partir de los cambios de caudal, para establecer relaciones con los factores relacionados con el hábitat de las especies objetivo que son considerados como limitantes para ellas (normalmente peces o invertebrados béticos). Las secciones son emplazadas en lugares donde el mantenimiento de los caudales se considera más crítico o donde los hábitat son más sensibles a la reducción de esos caudales (p.ej., zonas de rápidos). Para identificar esas relaciones entre hábitat y caudales, se suelen obtener nubes de puntos mediante el cruce de variables hidráulicas con descargas (a menudo utilizando modelos hidráulicos). Los métodos hidráulicos comprenden en general métodos que combinan el trabajo puramente analítico con la experiencia sobre el terreno, y suelen requerir una modelización hidráulica e hidrológica limitada, así como unos niveles de información y conocimiento ecológicos reducidos.

– **Método de Montana o de Tennant:** Se trata de un método de cálculo en gabinete, aunque en ocasiones también se utiliza alguna información obtenida sobre el terreno, para relacionar los caudales ecológicos con las poblaciones piscícolas, la fauna silvestre en sentido amplio, las actividades recreativas y otros recursos ambientales. Es uno de los métodos más utilizados en Estados Unidos y en Canadá, y su uso está también muy generalizado en otras regiones. Tradicionalmente se le ha clasificado como un método hidrológico, dado que su aplicación consiste en el cálculo de porcentajes fijos (entre el 10 y el 100% del módulo anual), aunque es un método básicamente hidráulico, ya que se fundamenta en la relación existente entre el caudal y diversas variables hidráulicas (profundidad, velocidad del agua y anchura de la lámina de agua).

– **Método de Idaho:** Se basa en el establecimiento de unos referentes de profundidad mínima y rango de velocidad del agua para distintas especies, según sus respectivas exigencias. De esta forma, el caudal de mantenimiento es, como mínimo, el primero que cumple tales referentes en una serie de secciones del cauce, también seleccionadas previamente como representativas de éste.

– **Método del Perímetro Mojado:** Se trata de uno de los métodos de mayor aplicación a nivel mundial. En esencia, el método del perímetro mojado asume que la integridad de un hábitat fluvial se puede relacionar directamente con el área de hábitat mojado (generalmente para biotopos en zonas de rápidos), ligando la superficie útil (para producción de alimento, freza, refugio,...) desde el punto de vista piscícola y en un tramo de río, con el caudal circulante, para obtener un referente de caudal de mantenimiento.

Cuando no se dispone de criterios para definir la superficie útil, el método propone adoptar, como caudal de mantenimiento, el punto de cambio de pendiente de la curva que relaciona el caudal y el perímetro mojado, o bien un porcentaje arbitrario (p.ej., el 50% del *bank-full*), como caudal mínimo que permita la reproducción.

– **Método R2Cross:** El método R2Cross requiere la selección de un rápido crítico a lo largo del río y asume que el caudal elegido para mantener el hábitat en el mismo es suficiente para mantener el hábitat para las poblaciones piscícolas en las pozas circundantes. En general, se puede considerar válido para la mayor parte de los estados de maduración de los peces y para los invertebrados acuáticos. Los requerimientos de caudal para la protección del hábitat en los rápidos se obtienen a partir de los caudales asociados a tres parámetros hidráulicos: la profundidad media, el porcentaje de perímetro mojado en las orillas y la velocidad media del agua.

– **Modelo RECE (Régimen estacional de caudales ecológicos):** Aunque el modelo RECE ofrece bastantes similitudes con el método BM o Vasco, incluye algunas consideraciones de interés para el cálculo del régimen de caudales ambientales, así como algunas modificaciones en torno a la rugosidad de los cauces utilizada en la simulación hidráulica.

### 3.3. MÉTODOS DE SIMULACIÓN DE HÁBITAT

Estos métodos se basan en el análisis de la cantidad e idoneidad de los hábitat físicos existentes y disponibles en los cauces para las especies objetivo, o para conjuntos de ellas (normalmente peces o invertebrados), bajo diferentes regímenes de caudales y sobre la base de distintos escenarios hidrológicos, hidráulicos y biológicos. Lo habitual en ellos es que los cambios en los micro-hábitat físicos, relacionados con los distintos caudales se modelicen mediante distintos programas hidráulicos. Estos métodos utilizan datos de una o más variables hidráulicas (calado, velocidad, composición del substrato, índices hidráulicos, etc.), cuyos valores se habrán recogido a lo largo de diferentes secciones, en un determinado tramo. Las condiciones de los hábitat disponibles, simuladas mediante programas específicos de modelización del hábitat, se relacionan con la información obtenida en torno a los intervalos de preferencia de las especies objetivo y/o comunidades existentes bajo la influencia de tales condiciones. Los resultados correspondientes, obtenidos en forma de curvas hábitat-caudal para la biota, se emplean entonces para predecir los caudales óptimos como caudales ecológicos.

Algunos de estos métodos consideran, además de la biota presente en él, aspectos tales como el transporte de sedimentos, la calidad de aguas, la vegetación riparia, etc. La información necesaria para el correcto funcionamiento de estos métodos incluye series históricas de caudales, variables hidráulicas en las distintas secciones y la idoneidad de los hábitat para las distintas comunidades de la biota. Algunos de los métodos más conocidos son: el *Oregon Usable Width Method*; el método R-6 del Servicio Forestal de EEUU; el método de Análisis por Múltiples Transectos o el método de Análisis de Duración de Hábitat, basado en el estudio de las curvas de duración de los hábitat, a través de determinados percentiles de condición de los mismos.

– **La metodología IFIM (Instream Flow Incremental Methodology):** La metodología de simulación de hábitat IFIM, considerada en su conjunto, es la más utilizada a nivel mundial y una de las más populares en general en la definición y establecimiento de regímenes de caudales ambientales (Bovee, 1982).

El término incremental hace referencia, en contraposición a las definiciones estándares, a sistemas de decisiones basados en la resolución de la incógnita que generan las modificaciones de determinadas variables ante determinadas operaciones. Es decir, no se definen valores mínimos, sino que se llevan a cabo procesos de negociación y decisión que evalúan diversas alternativas, y deciden en función de sus resultados previstos. En el caso de IFIM, las acciones propuestas suelen ser aquellas que tienen que ver con alteraciones del régimen de caudales, morfología del cauce, régimen de temperaturas, porcentaje de sombreado sobre las aguas o carga de sedimentos y/o contaminantes en el río (Bovee et al., 1998).

Por lo que respecta a la estructura de los hábitat, la metodología incluye el modelo conocido como Sistema de Simulación del Hábitat Físico (PHABSIM). Se trata realmente de un conjunto de modelos de simulación hidráulicos y del microhábitat, diseñado para cuantificar la cantidad de microhábitat disponibles para una especie objetivo bajo distintos valores de caudal.

Algunos métodos y modelos emanados de la metodología IFIM son: el modelo CASIMIR – FHABIM (*Computer Aided Simulation Model for Instream flow Requirement*) de simulación de la calidad del hábitat piscícola, que suele utilizarse en escalas espaciales correspondientes a tramos de longitud inferior a 1 km; el modelo RHABSIM (*Riverine HABitat SIMulation*); el modelo RHYHABSIM (*River Hydraulics and Habitat Simulation Program*) y el método RCHARC (*Riverine Community Habitat Assessment and Restoration Concept*).

– **Aplicación de la metodología IFIM a los ríos regulados de la Península Ibérica: el método del Hábitat Potencial Útil:** Los primeros intentos de adaptación de la metodología en España corrieron a cargo de García de Jalón (1990) y Cubillo et al. (1990). Durante estos últimos años, distintos autores han venido desarrollando el conocido como método del Hábitat Potencial Útil (HPU), adaptación de la metodología IFIM a los ríos ibéricos.

Los componentes básicos del método HPU son: un modelo de hidráulica fluvial que permita llevar a cabo la simulación de la estructura morfológica del río; unas curvas de preferencia de la fauna, es decir, unas funciones que cuantifican las preferencias y tolerancias de las especies acuáticas para cada combinación de condiciones ambientales y una evaluación del hábitat potencial útil.

– **Modelos bidimensionales:** Junto al uso extendido del PHABSIM y de sus principales adaptaciones, han aparecido en los últimos años modelos bidimensionales (p.ej., River 2D) que intentan mejorar las carencias más importantes atribuidas al PHABSIM. Estos modelos en 2D evitan los problemas de emplazamiento de los transectos, modelizan con mayor precisión las distribuciones de calados y velocidades en los cauces más complejos, representan con mayor fiabilidad las características de los microhábitats y facilitan la recogida de datos de entrada en los mismos. Pero sobre todo, permiten predecir y modelizar los hábitat de forma areal. Son todas ellas características que, en conjunto, mejoran en gran medida la resolución y flexibilidad de la información resultante.

### 3.4. MÉTODOS HOLÍSTICOS

Los métodos holísticos, que pueden ser entendidos más bien como procedimientos o protocolos de actuación, definen los caudales ecológicos a través de una solución consensuada mediante un análisis independiente de la magnitud y distribución del caudal que requieren los componentes del sistema fluvial objetivo, ya sean éstos aspectos abióticos (geomorfología, calidad del agua, etc.), ecológicos (comunidades naturales), perceptuales (paisaje), socioeconómicos, culturales, o un conjunto de ellos. Este proceso se puede realizar mediante aproximaciones descendentes (fijación de la abstracción máxima a la vista de los valores que se quieren mantener) o ascendentes (delimitación de objetivos para cada variable que dan en su conjunto el caudal final requerido), bajo el apoyo de equipos multidisciplinares de expertos e información más o menos detallada de cada una de las áreas que se tienen en consideración al definir el régimen ambiental de caudales.

– **La metodología BBM (Building Block Methodology):** La metodología BBM fue desarrollada en Sudáfrica a finales de los años 90. Esta metodología asume que, dentro del régimen hidrológico global, determinados caudales son más importantes para el mantenimiento de los ecosistemas fluviales. Estos caudales pueden ser identificados y descritos a través de su magnitud, duración, época del año y frecuencia. En conjunto, estos caudales constituyen un régimen específico relacionado con el objetivo marcado para el estado futuro de las principales variables del sistema fluvial.

– **La metodología AHA (Australian Holistic Approach):** Al igual que la metodología anterior, tiene por finalidad la determinación de los requerimientos hídricos del ecosistema en su conjunto, incluyendo las zonas de cabecera de los ríos, los cauces, las llanuras de inundación, las aguas subterráneas, etc., así como las especies animales y vegetales raras o amenazadas y otros aspectos de especial interés para el sistema. En esta interpretación se asume que los regímenes naturales de caudales de los ríos son capaces de mantener y conservar todas esas componentes, y que si las características básicas de estos regímenes naturales son incorporados al régimen intervenido, una gran parte de la integridad funcional del ecosistema fluvial debe mantenerse y persistir en el tiempo. Con el término integridad funcional, los autores hacen referencia a la diversidad genética y específica, a la estructura de la comunidad y a los procesos propios del ecosistema, tales como los ciclos de nutrientes y energía.

– **Otras metodologías holísticas:** aparte de las citadas con anterioridad, destacan: la *Metodología DRIFT (Downstream Response to Extended Flow Transformations Methodology)*; la *metodología BENCHMARKING*; la *metodología FLOWRESM (Flow Restoration Methodology)*; el *método EPAM (Expert Panel Assessment)*; el *método SPAM (Scientific Panel Assessment Method)*; el *método HAM (Habitat Assessment Method)* y el *procedimiento de muestreo y evaluación WAMP (Water Allocation Management Planning)*.

### 3.5. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DE CAUDALES DE LAS DISTINTAS COMPONENTES DEL SISTEMA FLUVIAL

Una vez analizados los cuatro grupos de métodos y metodologías que más comúnmente se citan en la literatura especializada, se exponen a continuación los métodos de evaluación de los requerimientos de caudales de las distintas componentes del sistema fluvial. La relación no pretende ser exhaustiva, ya que el dinamismo del medio augura una rápida evolución de estos conceptos. En los próximos años es muy probable que surjan nuevas visiones e interpretaciones, y que se consideren aspectos que posiblemente hoy no se encuentran desarrollados.

– **Métodos de cálculo de caudales ecológicos atendiendo a fines geomorfológicos:** La morfología del medio fluvial está regida fundamentalmente por la frecuencia y magnitud de las avenidas y por la granulometría del caudal sólido del río. Ante la dimensión e influencia de todos estos procesos (Bergkamp *et al.*, 2000), existen distintas propuestas de gestión para paliar estas alteraciones.

En algunos casos se ha propuesto permitir que las primeras avenidas de la temporada, cargadas de altas tasas de sedimentos, y enriquecidas con los ya existentes en los embalses, lleguen a los tramos aguas abajo de los mismos, antes de que esos materiales tengan oportunidad de sedimentarse.

Se ha propuesto, asimismo, la descarga de un caudal generador y de limpieza, para mantener las características de los sustratos y las dimensiones del cauce y eliminar los residuos orgánicos e inorgánicos presentes en él. Algunos autores (Stewardson & Gippel, 1997) han llegado a distinguir entre la descarga de caudales capaces de asegurar el mantenimiento de la forma general del cauce (*channel maintenance flows*) y la de aquellos que tienen por finalidad eliminar la vegetación que ocupa el cauce y los materiales finos depositados sobre el lecho y re-ordenar las formas del lecho a pequeña escala (*flushing flows*).

En otras ocasiones se realizan series de descargas de forma experimental para observar sus efectos y conveniencia en un río determinado, aunque este método requiere unas características bastante específicas en el embalse asociado y cuenta con la desventaja añadida del costo económico que supone. Se han llegado incluso a realizar análisis geomorfológicos mediante el marcado y seguimiento de sedimentos gruesos, aunque esta es una técnica muy poco extendida por el momento. También existen referencias del uso de métodos hidráulicos e hidrológicos en estos análisis, aunque están fundamentalmente dirigidos al cálculo del caudal generador.

– **Métodos de cálculo de los caudales ecológicos atendiendo a los requerimientos de la vegetación riparia:** La estructura y composición de las comunidades vegetales de ribera dependen en gran medida de los



FIGURA 1. Vegetación de ribera en el río Lozoya a la salida del embalse de la Pinilla. (Madrid).

gradientes que existen en las zonas de ribera y zonas húmedas. Malanson (1993) identificó dos gradientes principales: uno asociado a la geomorfología fluvial, y otro relacionado con la humedad disponible. En este sentido, las especies vegetales ocupan diferentes posiciones a lo largo de los ejes definidos por estos gradientes (fig.1). Por ello, las comunidades de vegetación riparia son muy sensibles a los cambios que se producen en el régimen hidrológico.

Una de las metodologías más notables es la que liga el régimen de caudales y algunas variables hidrológicas asociadas con el ecosistema ripario, principalmente a través del nivel del freático en el sistema fluvial en cuestión. Esta metodología (Kondolf, 1987; *Hydrogeomorphic Site Characterisation Methodology*) parte de la hipótesis de que las variaciones en el nivel freático pueden afectar de forma directa a la vegetación riparia. La utilización de esta herramienta metodológica requiere determinar si un tramo de un río está recibiendo o donando agua al nivel inferior de aguas subterráneas, o bien si se encuentra en equilibrio con él. Este aspecto define en gran medida cuál va a ser la sensibilidad del bosque de ribera a la disminución o aumento de caudales regulados y, por tanto, cuál va a ser su situación futura.

El método de Stromberg & Patten (1990) establece por el contrario una relación directa entre caudales y vegetación riparia. Los autores citados determinaron que el crecimiento de los anillos en algunas frondosas (*Flow-vegetation growth models*) mostraba una buena correlación con las variables hidrológicas, de donde dedujeron la existencia de una relación directa entre el volumen de los caudales y el crecimiento de la vegetación de ribera, que se supuso también necesario para el mantenimiento de las comunidades vegetales.

La consideración de esta componente es también usual en algunos de los métodos holísticos expuestos con anterioridad. En cualquier caso, el mantenimiento de un régimen de caudales ambientales que asegure *a priori* la

posible conservación o mejora del bosque de ribera debe ir asociado a otras medidas efectivas que garanticen esta conservación.

– **Métodos de cálculo de caudales ecológicos atendiendo a la calidad de las aguas:** Las evaluaciones de caudales ecológicos suelen dejar esta componente en un segundo plano, frente a la mera cuantificación de los volúmenes de agua. Sin embargo, el reconocimiento de su importancia para el funcionamiento del ecosistema, ha impulsado la definición de métodos y metodologías que incorporan el objetivo de buena calidad de las aguas. Entre los más destacados, se encuentran los modelos de calidad de aguas, la metodología IFIM y las metodologías holísticas.

– **Métodos de cálculo de caudales ecológicos atendiendo a la conservación de la fauna silvestre del ecosistema fluvial:** El establecimiento de regímenes de caudales ambientales que tengan en cuenta la conservación de la fauna silvestre no piscícola tiene también gran importancia sobre el conjunto del medio.

Actualmente, los principales estudios relacionados con la fauna existente en el ecosistema ripario se vienen realizando mediante los métodos de simulación de hábitat, especialmente a través del desarrollo de modelos predictivos. En este tiempo, ha sido bastante común la aplicación de la metodología IFIM, a través del desarrollo de curvas de preferencia, capaces de describir los hábitat propios de distintas poblaciones y comunidades. Estos métodos han estado casi siempre dirigidos a estimar la idoneidad de los caudales para determinadas especies acuáticas. Asimismo, existen referencias bibliográficas (Growthns, 1998) sobre los métodos utilizados para definir los caudales ecológicos que son necesarios para el mantenimiento de las poblaciones de invertebrados acuáticos. Entre ellos, destacan los dirigidos a conseguir el buen estado de los hábitat donde esos organismos llevan a cabo sus ciclos vitales.



– **Métodos de cálculo de caudales ecológicos atendiendo a la conservación del ecosistema fluvial litoral:**

La dinámica de los ecosistemas fluviales litorales muestra una gran dependencia con respecto a los caudales fluviales que llegan hasta ellos. Actualmente, una de las razones fundamentales del empleo de caudales ecológicos es el mantenimiento de los procesos vitales en estuarios, deltas y zonas fluviales litorales en general. Se trata de medios de gran productividad, fuertemente intervenidos por el hombre, pero que aún mantienen en muchos casos una importancia ecológica y socio-económica que hace imprescindible la adopción de medidas reales y efectivas de manejo. Distintos autores apuntan que no se puede extraer más de un 25-30% de los caudales históricos de un río sin que se produzcan consecuencias ecológicas desastrosas en estos ambientes (Rozengurt & Haydock 1981; Clark & Benson, 1981). Las modificaciones en la hidrodinámica y salinidad de estas zonas, como consecuencia de la regulación o en el aporte de sedimentos, alteran sustancialmente las condiciones físico-químicas de las aguas y las características de los hábitat existentes.

Ante la inexistencia de métodos capaces de abarcar de forma sistemática toda la variabilidad natural del medio, cualquier aproximación a la estimación de los caudales necesarios pasa, obligadamente, por la construcción de relaciones, más o menos sencillas, entre los distintos atributos del sistema y los caudales aportados por el río. De esta forma, se pueden construir modelos predictivos que puedan cuantificar la degradación de los citados atributos. En algunos casos, se pueden necesitar análisis de regresión múltiple o modelos multivariados.

– **Métodos de cálculo de caudales ecológicos atendiendo a la conservación de la cantidad y calidad de las aguas subterráneas:**

Existe una carencia casi absoluta de métodos que tengan en cuenta a las aguas subterráneas asociadas al medio fluvial. Esta variable se empieza a considerar actualmente en el establecimiento de caudales ambientales requeridos por la vegetación de ribera o por ciertos ecosistemas de zonas húmedas, especialmente dentro de determinadas metodologías holísticas. En todo este proceso, sería probablemente necesario utilizar modelos hidrológicos y modelos de respuesta ecológica, así como el consejo de expertos a través de mecanismos de negociación con los agentes implicados. En consecuencia, se tendrían que utilizar metodologías multi-criterio, capaces de prever los impactos sobre diversos aspectos ecológicos, socio-económicos y culturales del sistema.

Tampoco se debe olvidar que los acuíferos son también en sí mismos el soporte de un buen número de ecosistemas. En ellos, la fauna (a la que suele denominar con el nombre genérico de estigofauna), está básicamente compuesta por invertebrados. Algunos autores (Longley, 1992) apuntan que se ha llegado a identificar fauna en estos acuíferos, en profundidades de hasta 600 m. Evidentemente, las difíciles condiciones a las que estos seres se enfrentan, han motivado su evolución hacia una fuerte especialización morfológica y fisiológica. Por ello, la diversidad y el número de endemismos presentes en ellas son muy elevados, por lo que su conservación, evitando la sobre-explotación de estos sistemas acuíferos, se considera también como una de las recomendaciones necesarias en el establecimiento del régimen de caudales ambientales.

– **Métodos de cálculo de caudales ecológicos atendiendo a valores perceptuales (paisajísticos):**

El paisaje fluvial, en su estado natural, suele estar caracterizado por una gran diversidad de elementos, entre los que se incluyen masas de agua superficiales, bosques de ribera, zonas pantanosas y marismas, pero también diversos elementos geomorfológicos, como barras de sedimentos e islas, llanuras de inundación, terrazas, redes de cauces, zonas de depósito, meandros abandonados, etc. El medio acuático juega, sin duda, un papel fundamental en la conectividad de los diversos hábitat y elementos del paisaje, facilitando la transferencia de materia, energía y organismos vivos. La conservación de la riqueza y diversidad paisajística de estos sistemas requiere un conocimiento adecuado de las bases ecológicas y geomorfológicas del medio y, por tanto, una gestión integrada que asegure su conservación.

La acción de los caudales resulta el principal agente modelador del paisaje fluvial. Al desencadenar procesos de erosión, transporte y sedimentación, el caudal modifica las formas del terreno y promueve el equilibrio dinámico natural del río. Por esta razón, el mantenimiento de cualquier elemento del paisaje está directamente relacionado con el mantenimiento del régimen de caudales asociado a él. Los elementos geomorfológicos se ven transformados, en distintas escalas temporales, por la acción de las aguas, y con ellos el bosque de ribera, la distribución espacial de hábitat y especies, las transferencias energéticas y la propia calidad de las aguas. Todos estos aspectos configuran, de una u otra manera, el medio perceptual que es posible captar en un sistema fluvial; sin embargo, los elementos que más afectan a las características del paisaje son sin duda la distribución y estructura de la vegetación de ribera y el patrón morfológico del río en cuestión. Por tanto, es necesario evaluar los caudales requeridos para evitar degradaciones de estos elementos, e integrarlos en un régimen ambiental capaz de asegurar el mantenimiento de los valores paisajísticos en su conjunto. Es preciso, por ejemplo, permitir la existencia de un régimen de avenidas suficiente, con el fin de evitar la desconexión de los distintos estratos del bosque de ribera y la transformación forzada de comunidades y estructura. Eventualmente, se pueden también incluir caudales ecológicos que protejan elementos paisajísticos de interés de origen antrópico, si es que existen tales, como edificaciones asociadas al río, elementos arqueológicos, sendas, ciertos tipos de cultivos, etc.

– **Métodos de cálculo de caudales ecológicos atendiendo a valores socio-económicos:**

La introducción de la componente social en el cálculo de caudales ecológicos tiene la intención de dar respuesta a los impactos originados por las regulaciones fluviales sobre las poblaciones que están ligadas, en mayor o menor medida, a estos sistemas. Existen diversas opiniones sobre el papel que deben jugar estas poblaciones en la evaluación de los caudales ecológicos. En general, se considera que todos los seres humanos interaccionan con los regímenes de caudales y con el medio fluvial, ya sea a través de sus demandas de agua o a través de sus actividades en la cuenca vertiente. Puede proponerse, por ello, un proceso de participación pública (PPP) independiente, que se desarrollaría en paralelo a la fase de ingeniería y a la fase ambiental de la planificación del proyecto (p.ej., *Participatory Rural Appraisal (PRA)*,

*Participatory Action Research (PAR)*, etc.), que haga posible la actuación de los diferentes agentes sociales que intervienen de una u otra forma en el proceso general de gestión del agua, desde las Administraciones públicas hasta los concesionarios de aprovechamientos hídricos, incluyendo colectivos sociales, grupos políticos y usuarios finales.

**- Métodos de cálculo de caudales ecológicos atendiendo a valores culturales y recreativos:** Por lo que respecta a los valores culturales y recreativos del medio fluvial, suponen, por una parte, un servicio básico a las sociedades, que siempre han encontrado en los ambientes riparios lugares de esparcimiento y recreo. Por otra parte, se han constituido como un elemento de alta rentabilidad para los municipios y regiones por los que discurren cauces en los que se pueden llevar a cabo actividades deportivas, culturales o recreativas. Prácticamente en todas las sociedades, el elemento agua ha sido el objeto central de multitud de celebraciones de toda índole, dada la importancia que este recurso tiene para su desarrollo.

Para evaluar esta componente cultural, no existen métodos descritos de manera específica, ya que se puede considerar una variable dependiente de otras, como la vegetación de ribera, la geomorfología del río o la calidad de las aguas. Sin embargo, se trata de uno de los aspectos que mejor definen, en última instancia, el estado real del río, puesto que cualquier alteración grave de las características del medio fluvial hace inviable en muchos casos la celebración de las actividades antes citadas. En el caso de las celebraciones deportivas, es especialmente importante asegurar unas dimensiones de la lámina de agua que permitan la realización de estos eventos, así como una calidad de las aguas suficiente para que ésta no sea un obstáculo para la celebración de la competición o actividad. En cuanto a las actividades de índole cultural o religiosa, los gestores

deberán programar, para las fechas en que éstas se realicen, la descarga de caudales que no impidan por exceso o por defecto su celebración. Además, se deberá dotar al sistema de avenidas generadoras y de limpieza que aseguren el buen estado de las riberas y llanuras de inundación, en las épocas de afluencia a estas celebraciones.

Algunos de estos aspectos son los que se definen en la actualidad bajo el concepto de gestión cultural de los ríos, que no es sino una estrategia de acercamiento a los mismos. Esta gestión cultural es la que se debe incluir como etapa metodológica en el manejo de estos sistemas, para evitar que la regulación e intervención en los ríos suponga su desconexión con las poblaciones y comunidades. Esta gestión se podría conectar con los nuevos Planes de Uso de los embalses, dentro de los programas de Fomento Social y Adecuación Ambiental, para que desde ellos la planificación se extienda a los tramos de ríos afectados por estas obras (fig.2). En todos estos procesos sería deseable la participación de Ayuntamientos, Comunidades Autónomas y, por supuesto, de las Administraciones hidráulicas implicadas, como garantes del impulso de las iniciativas y del establecimiento de las limitaciones correspondientes.

### 3.6. MÉTODOS COMBINADOS

Los métodos combinados o híbridos comprenden un conjunto de métodos que incluyen características de más de uno de los cuatro grandes tipos de métodos de cálculo de caudales ecológicos (hidráulicos, hidrológicos, simulación de hábitat, holísticos). Debido a ello, se trata de métodos muy variados, tanto en su desarrollo, como en sus requisitos de utilización y resultados. Se han empleado en diversas regiones geográficas, generalmente del hemisferio sur y, de momento son bastante específicos para cada uno de los casos en que se han venido empleando.



**FIGURA 2.** Descarga de caudales a través de válvula de chorro hueco en el embalse de El Pardo (río Manzanares) (Madrid).

Como ejemplo se destacan algunos métodos ecohidrológicos, que constituyen enfoques de síntesis entre la aproximación hidrológica y los métodos de simulación de hábitat. En estos casos, el caudal ecológico se calcula a partir de datos hidrológicos, pero adoptando como referente los requerimientos de una o varias especies objetivo, definibles para cada caso, y para los que el caudal mínimo establecido debe permitir su conservación. Es un enfoque muy adecuado para la planificación de caudales ecológicos a nivel de grandes cuencas, pero no es muy apropiado para el cálculo de tramos en ríos concretos. Por ejemplo, en el *método de Québec*, se sigue en líneas generales este planteamiento, deduciendo los requerimientos de caudales ecológicos para las especies objetivo a partir de la regionalización hidrológica y la definición de una serie de especies objetivo en cada región. Las necesidades de cada especie se deducen de estudios disponibles o se obtienen expresamente para este fin, y para calcular los caudales ecológicos adecuados se parte de un tanteo de varios métodos que sólo requieren datos hidrológicos (como el ABF o el 7Q2).

#### 4. OTRAS APROXIMACIONES A LOS CAUDALES ECOLÓGICOS

Existen asimismo algunas aproximaciones que no pueden ser incluidas de forma específica bajo ninguno de los métodos y metodologías descritas con anterioridad. Así, por ejemplo, algunos autores se decantan por la utilización del régimen natural como base para el establecimiento del régimen de caudales ambientales. Para ello, insisten en que el modelo de gestión actual no reconoce, como principio fundamental, que la integridad de los sistemas fluviales depende básicamente de las características de su dinámica natural (Poff *et al.*, 1997), por lo que apoyan el reconocimiento de la variabilidad natural de los caudales y su explícita incorporación, mediante las cinco componentes fundamentales del régimen natural (magnitud, frecuencia, duración, época del año y tasa de cambio).

Otras interpretaciones fijan su atención, por el contrario, en las concesiones ya establecidas en muchos de nuestros ríos. Recordemos que la Ley de Aguas, en su art. 59.4, establece que: "Toda concesión se otorgará según las previsiones de los Planes Hidrológicos, con carácter temporal y plazo no superior a setenta y cinco años". En muchos casos, estas concesiones se basan en unas condiciones que son incompatibles con cualquier régimen que pretenda asegurar una variabilidad hidrológica y biológica adecuadas, y un funcionamiento apropiado de los distintos componentes del sistema. Las condiciones bióticas que corresponden a regímenes naturales han sido estimadas mediante parámetros cuantitativos por algunos investigadores (Richter *et al.*, 1997). A partir de estas estimaciones, algunos autores (García de Jalón, 2003) vienen proponiendo que se comparen los caudales circulantes por un río con los correspondientes al régimen natural. Una vez comparados, se aplicaría una mayor recarga económica a mayor intensidad de regulación por parte de la concesionaria en cuestión.

Esta última visión conecta en parte con la complicada financiación de los caudales ecológicos. Este aspecto no se ha incluido en este artículo por exceder de las posibilidades de espacio del mismo, pero debe ser tenido muy en cuenta en cualquier planificación de recursos hídricos.

Finalmente, no sería conveniente finalizar este repaso a algunos de los métodos e interpretaciones más destacados en el ámbito de los regímenes de caudales ambientales, sin hacer apenas una mención a los Sistemas de Apoyo a la De-

cisión en el establecimiento de caudales ecológicos. Los sistemas de apoyo a la decisión (*Decision Support Systems - DSS*) son unas herramientas relativamente novedosas, cuya aplicación, en el ámbito de la gestión hídrica, se encuentra aún en sus etapas iniciales. Pese a ello, ya están siendo utilizados por diversas instituciones y administraciones en diversos países. La utilización de estos sistemas en el establecimiento de caudales ecológicos se basa en el uso de los distintos modelos hidrológicos existentes, y en su combinación con modelos ecológicos. A través de ellos se pueden simular distintas condiciones de flujo, así como su influencia sobre diversos indicadores ambientales, como el estado de las poblaciones piscícolas, de la ornitofauna de ribera o de la vegetación riparia. Los Sistemas DSS modernos tienden a incluir en su desarrollo ciclos iterativos de consulta a los futuros participantes en su utilización.

#### 5. CONCLUSIONES

En este artículo, se ha pretendido recoger y analizar el amplio espectro de métodos y metodologías de cálculo de caudales ecológicos y regímenes de caudales ambientales existentes en la actualidad. El repaso previo a los conceptos básicos y a las nuevas tendencias presentes en este campo intentan mostrar asimismo la gran heterogeneidad de planteamientos que es posible encontrar a nivel nacional e internacional. Las propuestas realizadas por el autor tienen como fin completar algunos de estos enfoques en la aplicación de todos estos conceptos al caso español, y abrir la puerta al empleo de nuevas interpretaciones. El uso de métodos y metodologías integradoras de los requerimientos de las diversas componentes de los sistemas fluviales, junto a la incorporación de algunas aproximaciones novedosas, permiten presagiar una importante transformación de los planteamientos utilizados hasta la fecha, tendente a la consecución de una gestión moderna y eficiente de los recursos hídricos. Destaca de manera especial la inclusión de metodologías de cálculo a partir de criterios basados en la conservación de determinadas componentes del sistema fluvial. La combinación de los métodos clásicos de cálculo con algunas de estas nuevas aproximaciones, bajo criterios técnicos sólidos e integradores, parece ser la respuesta necesaria ante los nuevos requerimientos a que se enfrentan los profesionales encargados de la gestión de estos sistemas.

#### 6. AGRADECIMIENTOS

La investigación en la que se fundamenta la realización de este artículo ha sido llevada a cabo en el marco de la Beca de formación con que cuenta el autor en el Área de Ingeniería Ambiental del Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX.

#### 7. REFERENCIAS

- Arthington, A.H., Brizga, S.O., Kennard, M.J. 1998. *Comparative Evaluation of Environmental Flow Assessment Techniques: Best Practice Framework*. LWRRDC Occasional Paper No. 25/98. Land and Water Resources Research and Development Corporation (LWRRDC). Canberra, Australia.
- Bergkamp, G., McCartney, M., Dugan, P., McNeely J., Acreman, M. 2000. *Dams, Ecosystem Functions and Environmental Restoration*. World Commission on Dams (WCD) Thematic Review - Environmental Issues II.1.
- Bovee, K.D. 1982. *A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology*. Instream Flow

- Information Paper 12. U.S.D.I. Fish Wildl. Serv., Office of Biol. Serv. FWS/OBS-82/26: 248 pp.
- Bovee, K.D., Lamb, B.L., Bartholow, J.M., Stalnaker, C.B., Taylor, J.G., Henriksen, J. 1998. *Stream Habitat Analysis Using the Instream Flow Incremental Methodology*. Biological Resources Discipline Information and Technology Report USGS/BRD-1998-0004, Viii +131 p.
- Cachón, J. 2003. Régimen ambiental de caudales. Puesta en práctica en España: problemas, requerimientos y propuesta de soluciones. *Actas del Curso "Régimen Ambiental de Caudales"*. UIMP, Cuenca.
- Clark, J. & Benson, N.G. 1981. Symposium Summary and Recommendations. En: Cross, R.D. & Williams, D.L. (eds.): *Proceedings of the National Symposium on Freshwater Inflow to Estuaries (Vol. II)*: 523-528. U.S. Dept. of the Interior, Washington, D.C.
- Dyson, M., Bergkamp, G., Scanlon, J. (eds.). 2003. *Flow. The Essentials of Environmental Flows*. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. xiv + 118 pp.
- García de Bikuña, B. 1997. Problemática de la Determinación de Caudales Ecológicos y de su aplicación: Sistema RECE. *Actas de las Jornadas sobre Caudales Ecológicos y Caudales de Mantenimiento*. Valladolid, Abril 1997. Confederación Hidrográfica del Duero (Ministerio de Medio Ambiente).
- García de Jalón, D. 2003. The Spanish Experience in Determining Minimum Flow Regimes in Regulated Streams. *Canadian Water Resources Journal* 28(2): 185-198.
- Growns, I.O. 1998. Methods addressing the flow requirements of aquatic invertebrates. En: Arthington, A.H. & Zaslucki, J.M. (eds.). *Comparative evaluation of environmental flow assessment techniques: review of methods*. Land and Water Resources Research and Development Corporation Occasional Paper No. 27/98. Canberra, Australia.
- Gupta, P.N. 1998. *The necessity of environmentally sustainable dams projects for the 21st century*. Workshop on financing and private sector participation in water resources projects. 66th ICOLD Annual Meeting, 1-7 November, 1998, New Delhi, India.
- King, J.M. & D. Louw 1998. *Instream flow assessments for regulated rivers in South Africa using the Building Block Methodology*. Aquatic Ecosystem Health and Restoration.
- King, J.M., Tharme, R.E., Brown, C.A. 1999. *World Commission on Dams Thematic Report: Definition and implementation of instream flows*. Southern Waters, University of Cape Town, South Africa.
- Kondolf, G.M., Webb, J.W., Sale, M.J., Felando, T. 1987. Basic hydrologic studies for assessing impacts of flow diversions on riparian vegetation: Examples from streams of the eastern Sierra Nevada, California, USA. *Environmental Management* 11: 757-769.
- Longley, G. 1992. The subterranean aquatic ecosystem of the Balcones Fault Zone Edwards Aquifer in Texas - threats from over-pumping, 291-300. En: Stanford, J.A. & Simons (eds.): *Proceedings of the First International Conference on Groundwater Ecology*. American Water Resources Association, Bethesda, Maryland.
- Malanson, G.P. 1993. *Riparian Landscapes*. Cambridge University Press. New York
- Palau, A. et al. 1998. Els Recursos Hidrics. En: *Estrategia catalana per la conservació i l'ús sostenible de la diversitat biològica*. Institutió Catalana d'Historia Natural. Document inèdit. Barcelona.
- Poff, N.L., Allan, J.D., Bain, M.B., Karr, J.R., Prestegard, K.L., Richter, B.D., Sparks, R.E., Stromberg, J.C. 1997. The Natural Flow Regime. A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience* 47(11): 769-784.
- Richter, B.D., Baumgartner, R., Wigington, R., Braun, D.P. 1997. How much water does a river need? *Freshwater Biology* 37: 231-249.
- Rozengurt, M. & Haydock, I. 1981. Method of computation of ecological regulation of the salinity regime in estuaries and shallow seas in connection with water regulation for human requirements, pp. 474-506. En: Cross, R. D. & D. L. Williams (eds.), *Proceedings of National Symposium on Freshwater Inflow to Estuaries*, Vol. II. US Fish and Wildlife Service Report FWS/OBS-81-04.
- Stewardson, M.J. & Gippel, C.J. 1997. *Instream environmental flow design: a review*. Unpublished draft report by the Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Melbourne. Victoria.
- Stromberg, J.C. & Patten, D.T. 1990. Riparian vegetation instream flow requirements: A case study from a diverted stream in the eastern Sierra Nevada, California, USA. *Environmental Management* 14: 185-194.
- Tharme, R.E. 1996. *Review of the International Methodologies for the Quantification of the Instream Flow Requirements of Rivers*. Water Law Review Final Report for Policy Development for the Department of Water Affairs and Forestry, Pretoria. Freshwater Research Unit, University of Cape Town, South Africa.