

Técnicas avanzadas para la evaluación de caudales ecológicos en el ordenamiento sostenible de cuencas hidrográficas

Advanced techniques for evaluating instream flows in sustainable watershed management

Juan Manuel Diez Hernández¹ y Liliana Burbano Burbano².

RESUMEN

La potencialidad de las corrientes fluviales ha fascinado al hombre por su capacidad para satisfacer las demandas crecientes del recurso hídrico superficial a escala temporal y espacial. Actualmente la idea de que los caudales naturales de un río deban reservarse para preservar el funcionamiento prístino del ecosistema resulta utópica, al menos en sociedades que progresan. Una ordenación eficaz del recurso hídrico se caracteriza por ser racional y ecosistémica, con una gestión fundamentada en un régimen de caudales ecológicos (RCE) que compagina los usos del agua asegurando una condición aceptable del ecosistema. Este trabajo analiza la problemática de la regulación de caudales y aborda la necesidad de fijar los RCE para salvaguardar la integridad ambiental. Se presentan los métodos para calcular caudales ecológicos y las pautas especificadas en la legislación colombiana. Con la pretensión de estipular un procedimiento para determinar los RCE en Colombia, se resume la metodología IFIM (Instream Flow Incremental Methodology), ampliamente utilizada en el mundo, y que consideramos aplicable en los sistemas fluviales locales. Finalmente, se concretan las pautas operativas básicas de IFIM y el procedimiento que optimiza el balance entre el coste y la confiabilidad de un estudio convencional de caudales ecológicos.

Palabras clave: caudal ecológico, IFIM, hábitat acuático.

ABSTRACT

Rivers' potential for satisfying growing water demands has always fascinated human beings. The current idea that a river's natural flow should be reserved to conserve pristine dynamics is a utopian ideal, at least in countries having established a certain level of progress. Effective watershed planning is characterised by being rational and ecological, employing management based on environmental flows (EF), combining water use and ensuring acceptable ecosystem conditions. This work addresses the environmental consequences of regulating rivers and focuses on the need to fix IFs to protect fluvial systems' ecological integrity. The methods for calculating instream flows are presented as well as approaches provisionally specified in Colombia's legislative framework. Instream flow incremental methodology (IFIM), which is widely used around the world, is summarised to provide a basis for developing a procedure for determining IFs in Colombia as it would seem applicable to local streams. IFIM basic operative rules are then summed up, as is the procedure optimising the balance between a conventional instream flow study's costs and reliability.

Keywords: instream flow, IFIM, habitat.

Recibido: Julio 21 de 2005

Aceptado: diciembre 21 de 2005

Introducción

La alteración del régimen natural de caudales

Las corrientes fluviales proporcionan valiosas utilidades que han cautivado históricamente a las sociedades de manera distinta, dependiendo de las prioridades estipuladas y de la capacidad tecnológica del momento. El régimen hidrológico natural de los ríos ha sido controlado

progresivamente para satisfacer las crecientes demandas de recurso hídrico a escala temporal y espacial, asociadas al ámbito agropecuario, la generación hidroeléctrica y el abastecimiento humano e industrial. La regulación de caudales se realiza mediante las intervenciones estructurales

¹ Ph.D. Ingeniero forestal, profesor, Unidad de Hidráulica e Hidrología, ETS, Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid, Madrid (España). jmdiez@iaf.uva.es

² Bióloga de la Universidad del Cauca, Colombia, especialización en evaluación de impacto ambiental y auditorías ambientales en la Universidad de Valladolid, España. lilianab@iaf.uva.es

ligadas principalmente a los trasvases, derivaciones, presas, minicentrales e infraestructuras asociadas. Respecto a las emblemáticas grandes presas, el último informe de la Comisión Mundial de Presas (WCD, 2000) contabiliza más de 40.000 en el mundo, unas 980 en Suramérica y 49 en Colombia. Los servicios que proporcionan estas obras en el país son indiscutibles: (1) generan una hidroelectricidad que supone el 5,7% de la oferta energética nacional (IDEAM, 2001) y cubren el 68% del consumo eléctrico global (WCD, 2000); (2) abastecen de agua para el consumo doméstico y las actividades agrícolas e industriales; (3) amortiguan las crecidas en cuanto a la intensidad y duración; y (4) posibilitan actividades lúdico-recreativas.

La modificación del régimen hidrológico prístino ligada a las utilidades anteriores induce alteraciones significativas en la dinámica geomorfológica y en la integridad del ecosistema fluvial. Es conocido que el caudal es una variable esencial que integra muchos procesos ambientales y conforma el patrón estructural y funcional del ecosistema. La variación del caudal a escala temporal y espacial determina los procesos ecológicos fundamentales del río y su ribera asociada: (1) la disponibilidad, persistencia y conectividad del hábitat fluvial; (2) el grado de competencia y prelación entre especies; y (3) la tasa de entrada, transformación y flujo de nutrientes y materia orgánica (Poff, 2004). Un régimen de caudales se define por cinco componentes que incluyen la magnitud, frecuencia, duración, predictibilidad y tasa de variación (Poff y Ward, 1989): la alteración de los valores naturales de cualquiera de ellos perturba el funcionamiento, la estructura o la composición del ecosistema fluvial. Por otra parte, no es raro que una corriente regulada se encuentre también contaminada, dos adversidades evitables cuyo efecto sinérgico menoscaba dramáticamente el estado ecológico del sistema fluvial.

La relevancia del régimen de caudales ecológicos

La sociedad colombiana conoce con diferente grado de aproximación la información aportada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM en su divulgado "Estudio nacional del agua" (IDEAM, 2000), donde se destaca que las condiciones hidrológicas del país determinan una de las mayores ofertas hídricas del mundo (58 L/s.km²), valor que triplica el promedio de Latinoamérica y sextuplica la media mundial. Sin embargo, el análisis del Índice de escasez para aguas superficiales (IES) que incluye el estudio revela que, paradójicamente, cerca del 50% de la población urbana tiene riesgo de desabastecimiento en años hidrológicos intermedios y hasta un 80% durante sequías prolongadas. El ámbito científico, y progresivamente la sociedad colombiana en su conjunto están demandando la práctica de una nueva cultura del agua que defienda la gestión integral, ecosistémica y solidaria del recurso hídrico. Esta nueva filosofía propugna un aprovechamiento racional de los

bienes del río que salvaguarde valores intrínsecos cada vez más valorados, como son el ecológico, cultural, estético, recreativo y deportivo. Para propiciar este avance es indispensable que los planes de ordenamiento de cuencas incorporen como una restricción inicial un régimen de caudales ecológicos (RCE) en los tramos regulados, conformado por los valores del flujo mínimo capaz de mantener el funcionamiento, la composición y la estructura del ecosistema fluvial en unos niveles aceptables y coherentes con la dinámica natural. El RCE imita la fenología prístina mediante una serie foronómica temporal de escala y duración variable, definida en función de la adaptabilidad de la biocenosis fluvial a las variaciones del hábitat determinadas por el caudal, que es capaz de salvaguardar la integridad ecosistémica mediante unos niveles de estructura y diversidad admisibles.

La necesidad de respetar unos caudales ambientales mínimos en Colombia se explicita en el actual proyecto de Ley del Agua (Ministerio de Ambiente, 2006), que define el "caudal ecológico" como (Art. 21) "... los caudales mínimos que, de acuerdo con los regímenes hidrológicos, deberán mantener las corrientes superficiales en sus diferentes tramos, a fin de garantizar la conservación de los recursos hidrobiológicos y de los ecosistemas asociados". Adicionalmente, Colombia es signataria de varios convenios internacionales que incorporan de forma más o menos explícita el compromiso de respetar unos caudales que protejan el patrimonio fluvial. El Convenio para la conservación de la diversidad biológica (Río de Janeiro, 5/5/1992), ratificado en 1994 (Ley 165), señala la necesidad de preservar el patrimonio ecológico. El Convenio RAMSAR (1971) reconoce la importancia de los humedales en la conservación de la biodiversidad. El destacable programa "El hombre y la biosfera" promovido por la Unesco (1971) estipula las directrices para el manejo sostenible de la diversidad biológica. Además, Colombia se incorporó al Programa áreas importantes para la conservación de las aves (AICAS) en 2000, con la intención de estimular la conservación de zonas relevantes para la avifauna, cuya funcionalidad está vinculada a un régimen de caudales ajustado. Otro acuerdo referencial es el de la Convención sobre la protección del patrimonio mundial, natural y cultural (1972), adoptado por Colombia en 1983 (Ley 45), que obliga a la protección de lugares y recursos de interés mundial, entre los que se incluyen los cursos de agua.

Respecto de la terminología utilizable, juzgamos adecuada la denominación general de "caudal ecológico", debido a su amplia comprensibilidad en ámbitos diversos, si bien asumimos que su rigor conceptual sería debatible desde una perspectiva hidrobiológica estricta. En este sentido, la bibliografía recoge múltiples alusiones a este tipo de caudal, como las de "reservado", "regulado", "recomendado", "mínimo", "mantenimiento" o "ambiental", las cuales se interpretan en la práctica análogamente al intuitivo y aceptado vocablo "ecológico". En cualquier caso,

un verdadero régimen de caudales ecológicos debe analizar no solo los requerimientos mínimos de flujo de la biocenosis acuática, sino también las condiciones hidráulicas máximas soportables (p. ej., aguas abajo de un aporte de caudal trasvasado). Además, es necesario que integre otras especificaciones de flujo precisas para preservar la dinámica fluvial ("caudal generador"), asegurar la conexión periódica multifuncional entre el cauce y las márgenes ("caudal de inundación"), y mantener una potencialidad adecuada del medio intersticial ("caudal de lavado").

Metodologías para cuantificar el caudal ecológico

Aunque a escala mundial tan solo alrededor del 0,1% de la inversión en recursos fluviales se destina a la investigación (Statzner *et al.*, 1997), es destacable que existan más de 200 metodologías diferentes para evaluar caudales ecológicos en más de 50 países (King, 2004), lo cual refleja la trascendencia y complejidad de esta faceta esencial de la conservación ambiental de los ecosistemas acuáticos.

Estos métodos suelen agruparse en tres tipologías básicas, que enumeramos en orden creciente de aparición y rigor conceptual como enfoques (Figura 1): hidrológicos, hidráulicos y ecohidráulicos. Los primeros procedimientos Hidrológicos aplican diversos tratamientos estadísticos relativamente simples a las series foronómicas naturales, para deducir un "caudal mínimo", en términos de porcentajes de algún estadístico de tendencia central, de percentiles de la curva de duración de caudales, o bien de periodos de retorno asociados a fragmentos reducidos de la serie temporal. Por su semejanza con los criterios apuntados en la propuesta normativa colombiana, resumimos el superado método NGPRP (Northern Great Plains Resource Program; NGPR, 1974), que computa el caudal ecológico de cada mes como el percentil 90 de la curva de duración de caudales medios diarios (Q90), una vez excluidos los valores extremos de los períodos secos y húmedos (caudal igualado o superado el 90% del tiempo). Una aproximación algo más avanzada es la del método de Hoppe (1975), que integra los requerimientos biológicos de la ictiofauna para concretar los percentiles ligados a tres finalidades básicas: provisión de alimento y refugio (Q17), protección de la reproducción (Q40) y mantenimiento del cauce (Q80). Existen planteamientos simplistas que deducen el caudal ecológico como un porcentaje fijo del caudal medio anual (10%-20%) o de los caudales medios mensuales (30%), que están basados en concepciones del sistema fluvial excesivamente burdas y desaprobadas científicamente. En cualquier caso, la aplicación de estos métodos en zonas disimilares a las que fundamentaron

sus desarrollos resulta problemático, habida cuenta de la profunda incertidumbre de sus recomendaciones.

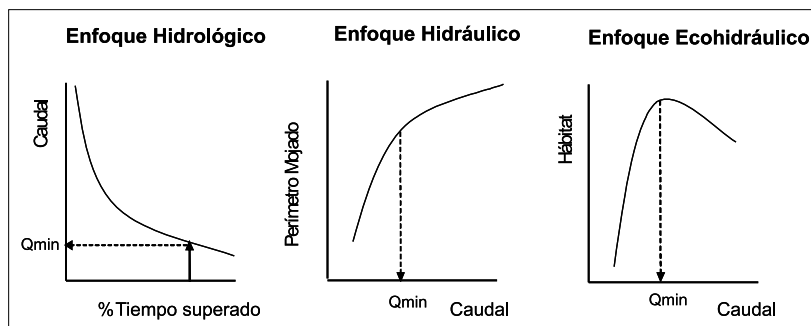


Figura 1. Tipologías básicas de los enfoques metodológicos utilizados para determinar Caudales Ecológicos. Los Hidrológicos realizan un análisis simple de las series de caudales (p.ej. curvas de duración). Los Hidráulicos interpretan la relación entre una variable hidráulica y el caudal. (p.ej. perímetro mojado). Los avanzados modelos Ecohidráulicos escrutan la relación funcional entre el hábitat físico acuático y el caudal.

Los métodos agrupados colectivamente como Hidráulicos examinan la variación de algunas variables del flujo (profundidad, velocidad, sustrato, perímetro) con el caudal en secciones transversales críticas de un tramo fluvial, con la finalidad de evaluar de forma aproximada el hábitat acuático generado dentro del rango de caudales normales. El método más genuino es el del "perímetro mojado" (Nelson, 1980), que desarrolla la relación funcional entre esta variable y el caudal en secciones de "rápidos", en cuyo punto de cambio de pendiente marcado se localiza el flujo mínimo. Un esquema predictivo determinante en la evolución de las técnicas de evaluación de caudales ecológicos es el "método de Washington" (Collings, 1972), desarrollado para cuantificar el hábitat apto para la freza y alimentación de los salmónidos que genera un caudal determinado. El procedimiento se apoya en la representación topográfica de un tramo fluvial mediante varias secciones transversales sucesivas, en las cuales se miden las velocidades y profundidades en puntos interiores durante varios caudales. Con esta información de partida, se combinan los campos simulados de ambas variables para un rango de caudales con los requerimientos conocidos de la ictiofauna, para obtener el campo de hábitat utilizable. Del análisis de la relación funcional entre la superficie del hábitat y el caudal se deducen: el caudal óptimo como el máximo de la curva, y el caudal mínimo como el 70% del óptimo.

Las sofisticadas técnicas ecohidráulicas cuantifican la cantidad y calidad de los hábitats acuáticos utilizables para unas especies objetivo o conjunto de ellas (normalmente peces o macroinvertebrados) bajo múltiples regímenes hidrológicos, y diferentes escenarios de estructura biológica configurables. La metodología más completa, acreditada y utilizada en el ámbito mundial, es la IFIM (Instream

Flow Incremental Methodology), promovida por el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE UU (Bovee y Milhous, 1978) como una técnica estándar multidisciplinar, cooperativa, incremental y progresiva para ordenar racionalmente el agua superficial con un claro enfoque ecológico. IFIM se trata de un completo marco conceptual filosófico avanzado, que incorpora enfoques ecohidráulicos y ecohidrológicos avanzados con el objeto de evaluar los efectos de cambios incrementales de caudal en la estructura del cauce, la calidad del agua, la temperatura y la disponibilidad de hábitat físico utilizable, utilizando una combinación de datos hidráulicos, hidrológicos y biológicos. Si bien IFIM fue desarrollada y aplicada inicialmente en pequeñas corrientes de aguas frías con poblaciones de salmonídeos al este de EE UU, su empleo se ha extendido a otras zonas disimilares durante las dos últimas décadas.

En el contexto iberoamericano, las primeras aplicaciones de IFIM se realizan a finales de los años ochenta en España y Portugal, países en los que esta metodología ha sido contrastada ampliamente y su utilización es progresiva. En cualquier caso, un régimen de caudales ecológicos completo debe estar definido con un enfoque holístico, integrador de los requerimientos de flujo ligados a los múltiples procesos ecosistémicos. Dependiendo de los valores prioritarios que se pretendan preservar en una aplicación concreta, el RCE incorpora una combinación de dos tipologías de caudales: (1) los biotipológicos, ligados a los componentes abióticos del ecosistema (calidad del agua, geomorfología, paisaje, etc.); y (2) los biocenológicos, diseñados para preservar los componentes bióticos (peces, macrobentos, ribera, etc.).

Cálculo de caudales ecológicos en Colombia

Actualmente las directrices para fijar los RCE en Colombia se concretan con claridad en el Art. 21 del proyecto de Ley del Agua (Ministerio de Ambiente, 2006), que designa al IDEAM para diseñar los lineamientos definitivos en esta materia. Hasta que eso se produzca, se plantea un procedimiento hidrológico con una concepción simple del sistema fluvial (Figura 2), que considera como caudal ecológico "...el valor de permanencia en la fuente durante el 90% del tiempo...". Anteriormente la Resolución 0865 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2004), que detalla la metodología de cálculo del índice de escasez, plantea dos métodos hidrológicos para calcular el caudal ecológico. El primero se basa en el Estudio Nacional del Agua (2000), y computa el caudal medio diario promedio de 5 a 10 años cuya duración es igual o mayor del 97,5%, que se comprueba corresponde a un período de retorno asociado de 2,3 años. El segundo enfoque vincula el caudal mínimo a un porcentaje aproximado al 25% del caudal medio mensual multianual menor de la corriente estudiada.

Una aproximación teórica a los criterios y metodologías para la determinación de caudales ecológicos en el país se expone en el trabajo analítico de Trujillo (1995). En cuanto a trabajos técnicos, conocemos dos aplicaciones modélicas de IFIM que supervisamos en ríos del Cauca (Campo y Hernández, 2001; Daza, 2002), lo cual no quiere decir que no existan otros estudios interesantes. A nuestro juicio, es conveniente que el marco normativo referencial en materia de caudales medioambientales precise de unas directrices rigurosas basadas en la "mejor práctica" aceptada científicamente, que estén alejadas de percepciones de la corriente excesivamente simplistas, y se fundamenten en métodos de cálculo que integren las diferentes necesidades de caudal del ecosistema: aunque IFIM no sea la panacea, pero de momento las investigaciones demuestran que es el método "menos malo" con carácter general.

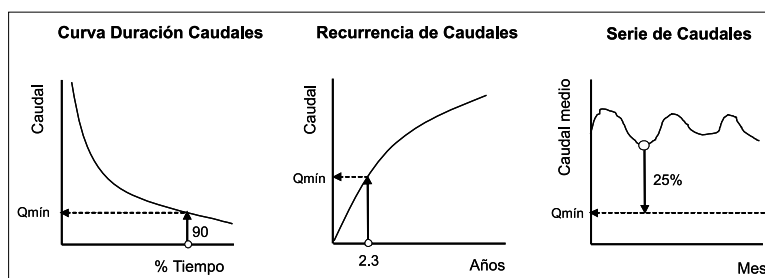


Figura 2. Lineamientos provisionales para determinar el Régimen de Caudales Ecológicos vinculados al Proyecto de la Ley del Agua de Colombia (2006). Estos tres métodos hidrológicos calculan un caudal mínimo asociado al percentil 90 de la curva de duración (izqda.), a la recurrencia de 2.3 años (centro), o bien al porcentaje aproximado de 25% del caudal medio mensual multianual menor (dcha).

Esquema operativo de la metodología incremental IFIM

Seguidamente, se extrae el procedimiento operacional y analítico de un estudio IFIM convencional de caudales ecológicos, el cual se detalla en los manuales referenciales (Bovee y Milhous, 1978; Bovee et al., 1997). El protocolo de caracterización fluvial de una modelación IFIM se inicia con tipificación e inventariación de los diferentes hábitats ecohidráulicos existentes en un tramo concreto (Figura 3). Conceptuando como "hábitat" un área relativamente homogénea con una velocidad, profundidad y sustrato característicos (Roussel y Bardonnet, 1997), existen múltiples tipologías con nivel de detalle variable en función de las particularidades del estudio. En una aproximación básica para arroyos vadeables, se clasifican como "rápidas" las zonas con control hidráulico de cauce sin remanso, donde la superficie libre es prácticamente paralela al lecho, y la corriente es agitada, somera (<30cm) y rápida (>30cm/s). Las "tablas" son lugares sin remanso ni obstrucciones, donde la corriente es ligeramente agitada, veloz y algo más profunda (30-60 cm). En los "remansos" se produce control hidráulico de sección y un marcado remanso, en el que la corriente es lenta (<30 cm/s) y profunda (>60 cm).

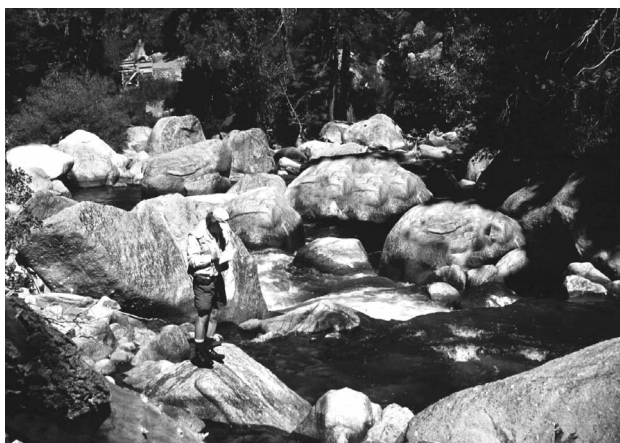


Figura 3. Arriba: Inventariación fluvial de un tramo de alta-pendiente: el técnico identifica y mide cada uno de los hábitats presentes desde la orilla. Abajo: Detalle de un hábitat tipo "cascada", con sustrato muy grueso de bolos ($>25\text{cm}$) y grandes bloques ($>100\text{cm}$), que produce un flujo turbulento y rápido ($>60\text{cm/s}$). Fotos del autor (río South Fork Stanislaus, California-EEUU).

Cada tipo de hábitat identificado se representa en el estudio mediante un número variable de secciones transversales, que se levantan topográficamente mediante al menos 20 puntos para conseguir unas resoluciones aceptables. En cada estacionamiento se reconoce el sustrato y se mide la velocidad media de la corriente con un molinete hidráulico, siguiendo el procedimiento estándar (Rantz, 1982): directamente con la lectura al 60% del calado (profundidad $< 75\text{cm}$), promediando las lecturas al 20% y 80% (prof. $75\text{ cm} - 120\text{ cm}$), y como la media ponderada de las tres mediciones anteriores duplicando el peso de la primera (prof. $>120\text{ cm}$). Con la captura de esta información de campo (Figura 4) se conforma un sistema de representación del cauce en forma de malla estructurada en múltiples prismas cuadrangulares ("cel-das"), que abarca todo el dominio modelable.

Con esta información de partida se desarrolla la simulación hidráulica de cada sección transversal, en la que se predicen sucesivamente los campos de profundidades y de velocidades para un amplio rango de caudales definido. Los esquemas numéricos que reúne IFIM permiten resolver los flujos permanentes asumidos normalmente, mediante aproximaciones de régimen uniforme o gra-

dualmente variado, en una tipología diversa de ambientes ecohidráulicos. Estas técnicas de modelación del microentorno hidráulico se calibran en cada sección con las mediciones de un número variable de niveles de superficie libre (NSL) y de distribuciones horizontales de velocidades medias ligadas a los puntos del levantamiento topográfico, con objeto de representar aceptablemente el rango de caudales examinado.

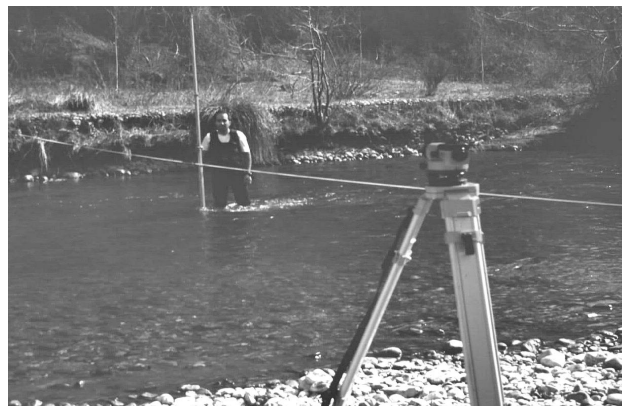


Figura 4. Arriba: Levantamiento topográfico de una sección transversal en una "tabla", mediante una nivelación clásica (río Carrión, España). Abajo: molinete hidráulico mecánico de copas, montado en un soporte de vadeo. Fotos del autor.

Las profundidades simuladas para un caudal determinado (Figura 5a) derivan del correspondiente NSL, deducido de la curva de calibración de la sección, la cual se genera mediante alguno de los siguientes esquemas de solución para un flujo permanente, que consideran la variación inherente de la rugosidad con el caudal en corrientes naturales: 1) la conocida ecuación de Manning para un régimen uniforme, aplicada con una conductividad variable en un área de flujo efectiva (modelo MANSQ); 2) método del "paso estándar" para un régimen gradualmente variado en secciones compuestas, con un patrón definido de variación del coeficiente de Manning con el caudal (modelo WSP); 3) ajuste de regresión lineal biogarámica de mínimos cuadrados entre el NSL y el caudal (modelo STGQ); o bien la 4) entrada directa de las predicciones con otras técnicas externas (p. ej., HEC-RAS). Como referencia, los estudios de

caudales ambientales IFIM-PHABSIM normalmente incorporan unos errores de simulación absolutos del orden de 3 mm a 6 mm (Waddle, 2001), y valores relativos menores del 1% en varias condiciones ecohidráulicas básicas (Díez Hernández, 2004a).

Durante la simulación de velocidades (Figura 5b), se conceptúa cada sección transversal como compuesta de múltiples celdas, cada una de ellas centrada en una de las verticales asociadas a los puntos del perfil transversal. En cada celda se asume un flujo unidimensional permanente y uniforme estricto, que se resuelve mediante dos métodos numéricos configurables que emplean diferente número de distribuciones horizontales de velocidades observadas. El primer enfoque, denominado "1-velocidad", utiliza solamente una distribución de velocidades, y modela el flujo mediante una formulación conjunta de las ecuaciones de Manning y continuidad, simplificada en cada celda (el radio hidráulico se iguala a la profundidad) para deducir un coeficiente de rugosidad que se considera constante. En ausencia de velocidades observadas, el segundo método, "no-velocidad", aplica en todas las celdas la misma expresión que "1-velocidad", pero con unos coeficientes de rugosidad prefijados por el modelador para lograr un cumplimiento aceptable de la conservación de masa. En cualquier caso, las velocidades calculadas con las técnicas anteriores se multiplican por un factor de ajuste de la velocidad (FAV), para conformar

una distribución de velocidades más coherente con el flujo simulado. En esencia, el FAV se trata de un algoritmo que reparte la diferencia entre el caudal calculado con las velocidades simuladas y el caudal simulado, entre todas las celdas, proporcionalmente a sus conductividades.

Recientemente Díez Hernández y Martínez de Azagra (2004a) han desarrollado un modelo de velocidades complementario denominado "LogD", que aplica la ley universal de distribución de velocidades de Prandtl-von Kármán (ver Graf y Altinakar, 1998; pp. 43) en diferentes algoritmos, dependiendo del número de distribuciones horizontales de velocidad disponibles. Los resultados obtenidos en varios ríos de España y EE UU revelan unas capacidades predictivas de las modalidades de "LogD" superiores a las de los métodos homólogos convencionales, reduciendo el error de simulación en torno al 5% cuando se dispone de velocidades (1-vel) y al 3% en ausencia de mediciones (no-vel).

El componente biológico de IFIM estriba en las "curvas de preferencia", que reproducen el grado de adecuación de un organismo y estadio vital respecto de las variables que determinan su hábitat físico, evaluado mediante un coeficiente que varía de cero a uno (Figura 6). Normalmente se utilizan las curvas de peces, aunque también existen para insectos, crustáceos, moluscos, reptiles, anfibios, perfiton, aves, e incluso recreación. Las variables imprescindibles son la profundidad y la velocidad, pero se suele incorporar el sustrato y ocasionalmente otras menos comunes (temperatura, número de Froude, etc.).

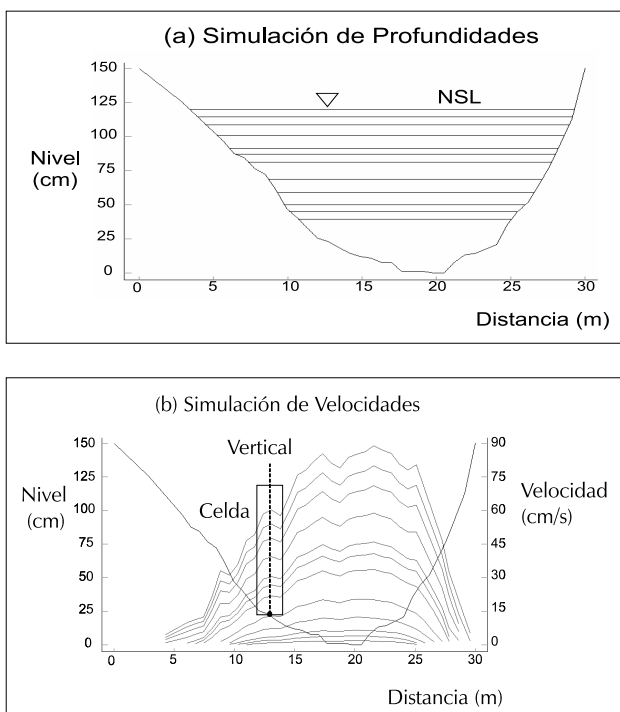


Figura 5. Modelación hidráulica convencional (1D) de una sección transversal desarrollada en los estudios IFIM de Caudales Ecológicos. (a) Simulación de las profundidades derivadas de los Niveles de Superficie Libre (NSL) en el rango de caudales analizables. (b) Simulación de la distribución horizontal de velocidades asociada a cada caudal; el dominio de flujo queda discretizado mediante celdas centradas en las verticales ligadas a los puntos topográficos.

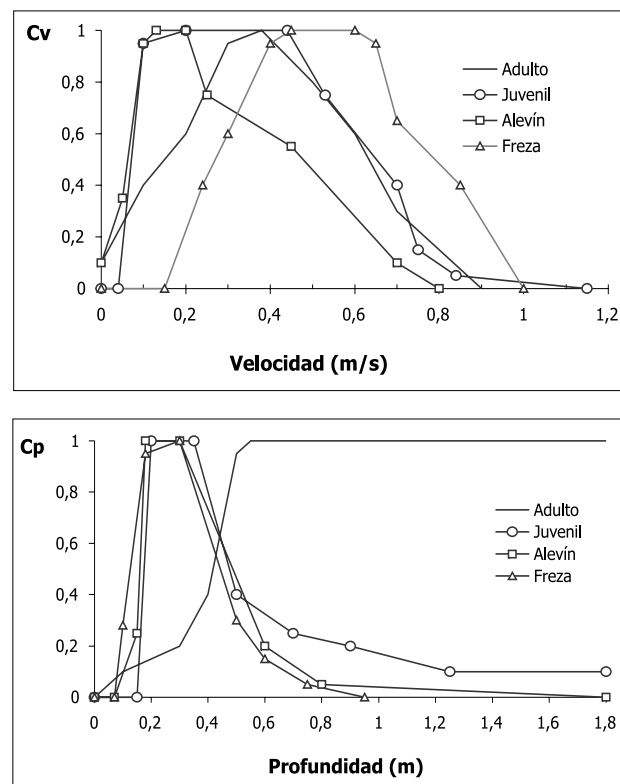


Figura 6. Curvas de preferencia referenciales para la velocidad y profundidad de la trucha arco iris (*Onchorrhynchus mykiss*), elaboradas originalmente por Bovee (1986).

La modelación ecohidráulica del hábitat acuático se realiza combinando adecuadamente los campos simulados de profundidades y velocidades con las curvas de preferencia de la/s especie/s objetivo, para desarrollar las decisivas relaciones funcionales entre el caudal (Q) y un "índice de hábitat (IH)" que evalúa la calidad conjunta del microhábitat. En primer lugar, se calcula el "Coeficiente de Conformidad" (C_i) de cada celda (i), mediante la agregación multiplicativa de los coeficientes correspondientes a las variables analizadas (p. ej.: v =vel., p =prof., s =sust.): $C_i = C_{v_i} * C_{p_i} * C_{s_i}$. El Índice de Hábitat de una sección (IH_s) se computa normalmente agregando las contribuciones individuales de todas las celdas mojadas durante cada caudal simulado, mediante la siguiente expresión: $IH_s = \sum (C_i * A_i)$, donde A_i es la anchura superficial de una celda. Existen otros sistemas de ponderación del microhábitat menos utilizados, que utilizan el perímetro mojado o el volumen de una celda. La calidad y cantidad del hábitat acuático físico utilizable para un organismo determinado durante un caudal modelado se evalúa mediante el IH total, que se calcula ponderando los IHs de todas las secciones transversales en función de las longitudes fluviales que representan (L_j): $IH = \sum (IH_s * L_j)$. Repitiendo este proceso con cada uno de los flujos que se desean simular y para las curvas de preferencia seleccionadas, se obtienen las conocidas relaciones Q-IH, a partir de las cuales se determinan los caudales ecológicos convenientes para cada organismo y estadio vital (Figura 7). El rango de simulación máximo recomendado para obtener unas relaciones confiables está comprendido entre el 40% del caudal observado menor y el 250% del caudal mayor, habida cuenta de que las extrapolaciones exteriores generan errores hidráulicos excesivos (Bovee y Milhous, 1978). En ecosistemas fluviales con estructura relativamente simple o en estudios enfocados a favorecer una especie concreta, el análisis se resuelve con unas pocas curvas de preferencia pertenecientes a la especie "objetivo". Sin embargo, el estudio de comunidades diversas se complica, puesto que se deben encontrar unos caudales que equilibren las necesidades de todas las especies (a veces contrapuestas), lo que exige el escrutinio de más relaciones Q-IH.

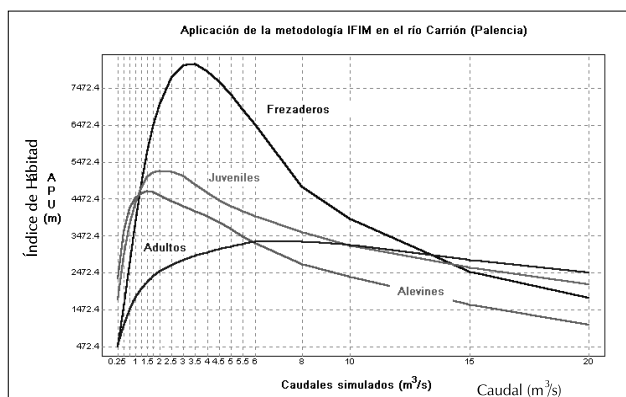


Figura 7. Relaciones Caudal - Índice de Hábitat (Q-IH) para los cuatro estadios de la trucha común (*Salmo trutta*) en un tramo regulado del río Carrión (Barrios de la Vega, España). Los puntos de inflexión o zonas con disminución notable de la pendiente definen los Caudales Mínimos Óptimos asociados a cada curva.

Cada colectivo implicado en la gestión del agua persigue intereses distintos y propone alternativas acordes con los mismos. Como habitualmente las conveniencias de los grupos son contrapuestas, la mejor alternativa de ordenación hídrica es fruto de una negociación en la que se acuerda la opción que satisface del mejor modo los objetivos de todos los colectivos en términos de efectividad, factibilidad, riesgo y valoración económica. Para este proceso resulta muy útil la serie temporal de hábitat (STH), que representa la evolución del índice de hábitat (IH) en el tiempo, bajo una alternativa determinada (Figura 8). Para su elaboración se combina cada caudal individual de la serie temporal de caudales (STC) con su valor de IH correspondiente, deducido de la función IH-Q precalculada.

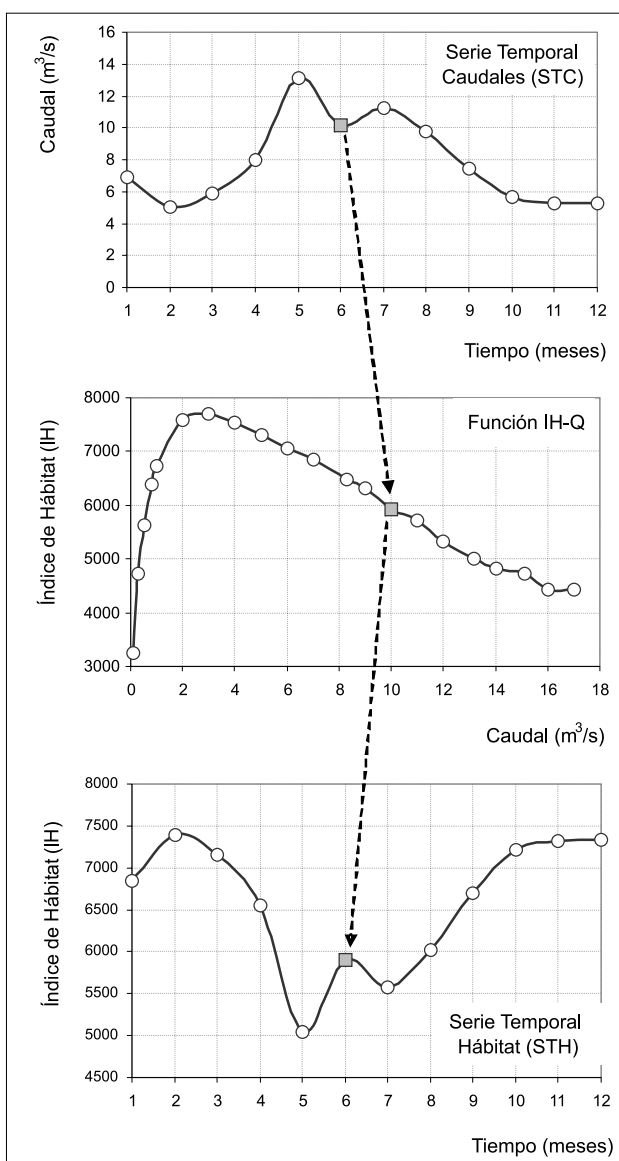


Figura 8. Elaboración de la Serie Temporal de Hábitat (STH) de promedios mensuales, para la trucha común (*Salmo trutta*) correspondiente al régimen actual de caudales regulados en el río Carrión (Barrios de la Vega, España). Cada caudal de la Serie Temporal de Caudales (arriba, p.ej. mes 6 = 10 m³/s) se combina con su valor de hábitat asociado en la Relación IH-Caudal (medio, p.ej. 10 m³/s = 6000), y se representa en la Serie Temporal de Hábitat (abajo, p.ej. 6000).

En cualquier caso, el análisis de las STH no es sencillo, porque normalmente se comparan alternativas correspondientes a varias especies y estadios. Además, no es raro que una alternativa favorezca a un organismo pero perjudique a otro, por lo que resulta difícil predecir la variación del IH en una comunidad. Acumulando los valores del IH generados en cada alternativa a lo largo de un período de tiempo, se obtiene el índice de hábitat acumulado (IHA), que suele representarse gráficamente mediante histogramas, para analizar el efecto de cada alternativa en el conjunto de la población (Figura 9).

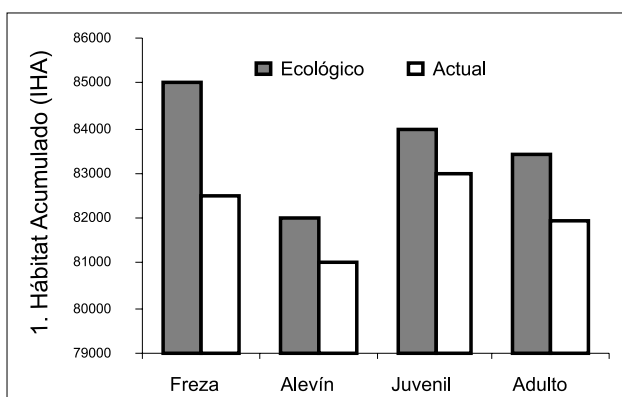


Figura 9. Comparación de los Índices de Hábitat Acumulado (IHA) generados para los cuatro estadios de la trucha común (*Salmo trutta*) en el río Carrión (Poza de la Vega, España), mediante el régimen Actual de caudales y el Régimen de Caudales Ecológicos. La solución ecológica disminuye el caudal adicional que circula actualmente durante la campaña de riego (aprox. mayo-septiembre), el cual provoca un flujo artificial demasiado rápido que resulta inconveniente para el sistema ecológico. El efecto beneficioso del RCE se demuestra en términos del aumento sustancial del hábitat (IHA) en todos los estadios.

El modelo hidrobiológico que incluye IFIM resulta una herramienta valiosa en los trabajos técnicos de mejora del hábitat fluvial y restauración de riberas. Mediante la aplicación informática RHABSIM© versión 3 en español (TRPA, 2004) es posible generar una panorámica en planta del tramo estudiado, diferenciando las múltiples celdas establecidas según el sistema de caracterización unidimensional (Figura 10). Examinando los coeficientes de conformidad de las celdas, se definen intervalos asociados a colores intuitivos, con lo que se obtiene una "fotografía" del hábitat acuático disponible para un organismo determinado durante un caudal simulado. Esta posibilidad facilita al técnico la toma de decisiones considerablemente, verbigracia en lo que se refiere a la ubicación idónea de frezaderos artificiales, deflectores de corriente, refugios para peces, limpieza del medio intersticial, estabilización de márgenes mediante bioingeniería, etc.

Pautas básicas para fijar los caudales ecológicos en Colombia

A continuación se exponen las recomendaciones generales principales que se refieren al marco conceptual y procedimental que juzgamos conveniente para determinar RCE en Colombia, teniendo en cuenta las particularidades ecohidrológicas e hidráulicas de los sistemas fluviales del país y el contexto socioeconómico a considerar en los planes de ordenamiento de cuencas. Estas ideas derivan de las experiencias propias en estudios de caudales ambientales en ríos de tipologías ecohidráulicas diversas (España, EE UU y Colombia), así como de los conocimientos asimilados de la literatura internacional.

En primer lugar, es necesario que la legislación en materia del agua se refiera a un régimen de caudales ecológicos (RCE), con caudales variados en las diferentes épocas del año y adecuados para los distintos estadios vitales y composiciones del ecosistema.

Un RCE completo debe incluir unas crecidas ordinarias programadas, asociadas a una recurrencia coherente con las dinámicas geomorfológicas y ecológicas locales. En este sentido, las experiencias en España (CEDEX, 1994) asocian a estos flujos un periodo de retorno calculable dentro del intervalo de 1,1 a 9,8 años. La duración de estas avenidas artificiales para remover los sedimentos y

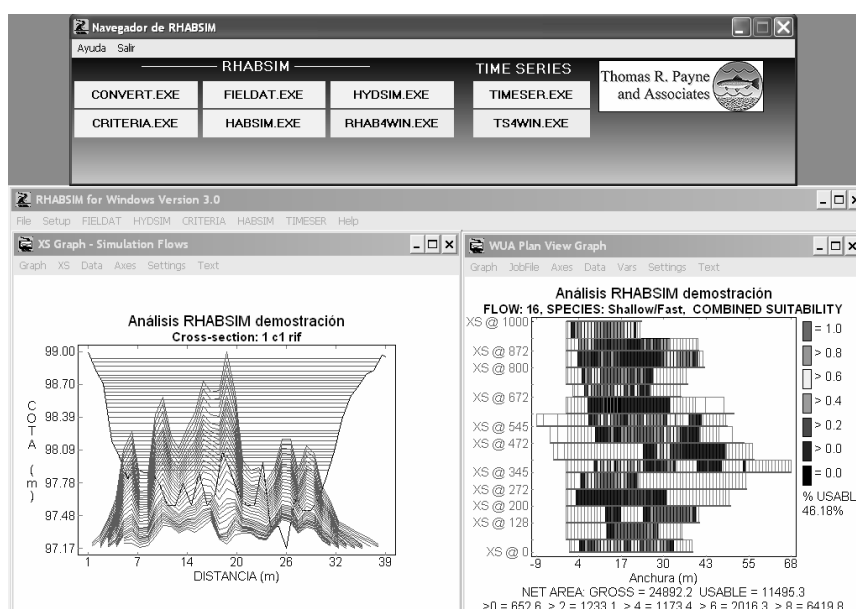


Figura 10. Captura de una pantalla del paquete informático RHABSIM© en español (TRPA, 2004) presentando algunos gráficos de la modelación IFIM. Arriba: navegador del programa, desde el que se accede a los diferentes módulos. Abajo izqda.: modelación hidráulica de una sección transversal, que incluye los Niveles de Superficie Libre y las distribuciones de velocidades. Abajo dcha.: Vista en planta del hábitat generado en el tramo por un caudal simulado, que muestra las celdas mojadas de todas las secciones, codificadas con color según el rango de sus Coeficientes de Conformidad.

conservar la morfología del cauce que se recomienda en la literatura es variada: desde un mínimo de 24 horas (Gore y Petts, 1989) hasta una persistencia entre 2 y 4 días (Milhous, 1998), si bien parece lógico, desde un razonamiento hidrológico, que sea mayor que el tiempo de concentración de la cuenca.

En instalaciones hidroeléctricas es primordial que el RCE contemple unas tasas máximas de cambio de caudal por unidad de tiempo, para evitar el arrastre de organismos (peces, anfibios y macroinvertebrados) durante el incremento de caudal, así como el aislamiento durante la fase de recesión. El procedimiento más lógico, para fijar estos límites consiste en observar los hidrogramas de las crecidas naturales de la cuenca y deducir el intervalo asociado a los fenómenos ordinarios. A modo de ejemplo, alguna legislación regional en España explicita una tasa de variación máxima del 5% por minuto.

Los métodos hidrológicos para estimar caudales ecológicos precisan de una información foronómica representativa y fiable (extensa), que no siempre está disponible en los tramos fluviales a estudiar. La carencia de una integración explícita de los requerimientos de hábitat de la biocenosis fluvial propia de cada río confiere a estos métodos una notable incertidumbre, que los hace muy poco eficaces para una negociación encuadrada en la gestión ecosistémica del agua que se propugna progresivamente en el país.

Un marco normativo avanzado en la gestión del agua debe concretar los criterios y las metodologías para determinar los RCE que estén más aceptados científicamente y favorezcan la negociación entre los distintos colectivos implicados en la gestión del recurso. Por el momento, la metodología más contrastada y aplicada en el mundo es la IFIM, herramienta que consideramos idónea para incorporar los RCE en la planificación de cuencas en Colombia. Existe un protocolo de caracterización en campo para los análisis IFIM que optimiza el balance entre la exactitud y el costo de un estudio, el cual ofrece unos resultados confiables en las aplicaciones ordinarias para calcular RCE de precisión estándar. Por su aplicabilidad en las corrientes de Colombia, se resumen a continuación las pautas fundamentales:

- El valor medio referencial de secciones transversales a utilizar en un estudio IFIM convencional de RCE es de 18-20 en tramos hidráulicamente complejos y de 6-10 en ambientes simples. Nuestras experiencias corroboran esta práctica, evaluada en el exhaustivo estudio de Payne (2003), puesto que con esas intensidades de muestreo hemos obtenido unas relaciones hábitat-caudal consistentes.
- Resulta crucial una inventariación fluvial correcta para que la modelación ecohidráulica incorpore todos los hábitats existentes en el tramo, en forma de secciones transversales. Una tipificación fluvial básica y que hemos comprobado efectiva, consta de los siguientes

hábitats: rápidos, tablas (lentas/rápidas), remansos (vadeables/no vadeables) y áreas no modelables (p. ej. cascadas). En cualquier caso, ninguna sección transversal debe representar más del 5%-10% de la longitud total.

- La información hidráulica de campo mínima que se debe capturar en cada sección transversal consiste en: 1) un mínimo de tres caudales y sus correspondientes niveles de superficie libre; 2) una distribución de velocidades medida durante un caudal alto medible con seguridad. Además, se caracteriza el material del lecho en cada celda con un sistema coherente con la curva de preferencia empleada.
- Dependiendo de la diversidad del ecosistema se pueden utilizar curvas de preferencia de unas pocas especies identificables como "objetivo" (composición simple) o bien de "gremios" que aprovechan un hábitat común (más compleja). Los criterios de preferencia gremiales representan las condiciones ecohidráulicas preferidas por ciertos grupos de especies, conocida la tendencia de algunos organismos a utilizar el hábitat acuático de la misma forma (Bain y Knight, 1996). Así, combinando intervalos de profundidades y velocidades hemos empleado (Diez Hernández y Martínez de Azagra, 2004b) las curvas de "gremios" para zonas (1) someras y rápidas, (2) someras y lentas, (3) profundas y lentas, y (4) profundas y rápidas.

Siguiendo este protocolo de caracterización, hemos comprobado que se obtienen modelaciones ecohidráulicas confiables para los estudios IFIM de caudales ecológicos normales de precisión estándar. No parece necesario incorporar información de campo adicional, puesto que no mejora la fiabilidad del análisis significativamente (Payne, 2003; Díez Hernández, 2004a). En su lugar, es preferible destinar esos recursos para obtener una inventariación fluvial más acertada y unas curvas de preferencia fidedignas.

Las recomendaciones anteriores no pretenden ser en modo alguno unas directrices rígidas para la determinación de caudales ecológicos en Colombia, sino una información referencial extractada, que está fundamentada en los avances científicos conseguidos durante las dos últimas décadas en el campo de la modelación del hábitat fluvial. Es previsible una intensificación progresiva de la regulación de caudales en las corrientes de Colombia, provocada por el desarrollo creciente de actividades ligadas a la mejora del bienestar socioeconómico. Por este motivo, parece indudable que el régimen de caudales ecológicos es un componente esencial del ordenamiento sostenible de cuencas hidrográficas, y su importancia es cada vez más reconocida por una sociedad cuya conciencia ambiental va en aumento.

Dos aspectos básicos para la correcta gestión ecosistémica del agua mediante RCE son: 1) la selección de un procedimiento de cálculo avanzado que integre los requerimientos ecológicos del ecosistema y esté ampliamente contrastada científicamente; así como 2) la estandarización

del proceso operativo para la caracterización fluvial, el procesamiento de los datos, la interpretación de los resultados y el análisis de las alternativas. Aprender de los errores cometidos en otros países posibilita la elección del método idóneo para asignar caudales ambientales en Colombia. La tendencia a escala mundial se ha alejado de soluciones rápidas con percepciones simplistas del sistema fluvial, y se centra en esquemas predictivos cimentados en modelos hidrobiológicos como IFIM, capaces de generar soluciones que conjugan los intereses conservacionistas y desarrollistas alrededor de los ríos. Pensamos que, aunque la metodología IFIM no es la panacea, resulta plenamente aplicable en Colombia, y su efectividad puede mejorarse optimizando la adaptación a las condiciones ambientales particulares.

Bibliografía

- Bain, M.B. and Knight, J.G., Classifying Stream Habitat Using Fish Community Analyses, Proceedings of the 2nd International Symposium on Habitat Hydraulics, INRS-Eau, Quebec (Canadá), 1996.
- Bovee, K.D., y Milhous, R.T., Hydraulic Simulation in Instream Flow Studies: Theory and Techniques, Instream Flow Paper No.5, US Fish & Wildlife Service, FWS/OBS-78/33, 1978.
- Bovee, K.D., Development and Evaluation of Habitat Suitability Criteria for Use in the Instream Flow Incremental Methodology, Instream Flow Paper No. 21, Fort Collins (CO-EEUU), 1986.
- Bovee, K.D., Lamb, B.L., Bartholow, J.M., Stalnaker, C.B., Taylor, J. y Henriksen, J. Stream Habitat Analysis Using the Instream Flow Incremental Methodology. Information Technology Report 1997-0003, US Geological Survey, Fort Collins (CO-EEUU), 1997.
- Campo, Y. y Hernández, D., Estimación del Régimen de Caudales Ecológicos en el río Palacé (Cauca), tesis Universidad del Cauca (Popayán), Lic. en Biología, 2001.
- Cedex, (Centro de Estudios y Experimentación), Aspectos Prácticos de la Definición de la Máxima Crecida Ordinaria, Madrid (España), 1994.
- Collings, M.R., A Methodology For Determining Instream Flow Requirement for Fish, Pro. of Instream Flow Methodology Workshop, Washington Dep. of Ecology, Olympia (WA-EEUU), 1972, pp. 72-86.
- Daza, C.P., Determinación de Caudales Ecológicos en el río Las Piedras (Cauca), tesis Fundación Universitaria de Popayán (Popayán), Lic. en Ecología, 2002.
- Díez Hernández, J.M., The Influence of 1D Hydraulic Simulation on the PHABSIM Habitat Index, Proceedings of Fifth International Symposium on Ecohydraulics, Madrid (España), Universidad Politécnica de Madrid, 12-14 septiembre 2004, 2004a, en CD.
- Díez Hernández, J.M., and Martínez de Azagra, A., Predictive Capability of the New "Logd" Method for Velocity Modeling in PHABSIM, Proc. Fifth International Symposium on Ecohydraulics, Madrid (España), Universidad Politécnica de Madrid, 12-14 septiembre 2004, 2004a, en CD.
- Díez Hernández, J.M. and Martínez de Azagra, A., Directrices para la Modelación Hidráulica de Caudales Ambientales con la Metodología IFIM. IV Congreso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua, Tortosa (España), Fundación Nueva Cultura del Agua, 8-12 diciembre 2004, 2004b, en CD.
- Gore, J.A. and Petts, G.E. Alternatives in Regulated Rivers Management, CRC Press, 1989.
- Graf, W.H. and Altinakar, M.S. Fluvial Hydraulics: Flow and Transport Processes in Channels of Simple Geometry, Chichester, Wiley & Sons, 1998, pp. 43.
- Hoppe, R.A., Minimum Streamflows For Fish. Proceeding of the Soils Hydrology Workshop, Bozeman, Montana (EEUU), U.S. Forest Service, Montana State University, 1975.
- IDEAM, (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). Estudio Nacional del Agua, Bogotá, <http://www.ideam.gov.co/publica/index4.htm>, 2000, pp. 27-39.
- IDEAM, (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). El Medio Ambiente en Colombia, Bogotá, <http://www.ideam.gov.co/publica/index4.htm>, 2001, pp. 458-461.
- King, J., Environmental Flows for Fluvial Maintenance and Conservation. Proceedings of Fifth International Symposium on Ecohydraulics, Madrid (España), Universidad Politécnica de Madrid, 12-14 septiembre 2004, pp. 25-37.
- Milhous, R.T., Modelling of Instream Flow Needs: The Links Between Sediment and Aquatic Habitat, Regulated Rivers: Research and Management, 14, 1998, pp. 79-94.
- Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial de Colombia. Resolución 0865 de 2004 por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el decreto 155 de 2004, Diario oficial N° 45630 de Agosto 4 de 2004, 2004.
- Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial de Colombia. Proyecto de Ley del Agua. <http://www.miniambiente.gov.co>, 2006.
- Nelson, F., Evaluation of Four Instream Flow Methods Applied to Four Trout Rivers in Southwest Montana, Montana Dept. Fish Wildlife and Parks Report (14-16-006-78-046), 1980.

NGPRP, (Northern Great Plains Resource Program), Instream Needs Subgroup Report: Work Group C), Northern Great Plains Resource Program, USFWS, Washington DC, 1974.

Payne, T.R., The Number of Transects Required to Compute a Robust PHABSIM Habitat Index. Proc. of International IFIM user's workshop, 1-5/6/03, Fort Collins (CO-EEUU), 2003, en CD.

Poff, N.L., Natural flow regime as a paradigm for river restoration, a hydroecological context for ecohydraulics?, Proceedings of Fifth International Symposium on Ecohydraulics, Madrid (España), Universidad Politécnica de Madrid, 12-14 septiembre 2004, pp. 19-24.

Poff, N.L., y Ward, J.V., Implications of Streamflow Variability and Predictability for Lotic Community Structure: A Regional Analysis of Streamflow Pattern, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 46, 1989, pp. 1805-1818.

Rantz, S.E., Measurement and Computation of Streamflow, USGS Water Supply Paper 2175, 1982.

Roussel, J. M. y BARDONNET, A. Dial and Seasonal Patterns of Habitat Use by Fish in a Natural Salmonid Brook: An Approach to the Functional Role of the Riffle-

Pool Sequence, Bulletin Francais de la Peche et de la Pisciculture, 346, 1997, pp. 573-588.

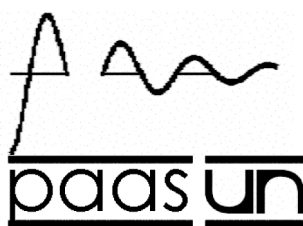
Statzner, B., CAPRA, H., Higler, L.W.G. y Roux, A.L. Focusing Environmental Management Budgets on Non-linear System Responses: Potential for Significant Improvements to Freshwater Ecosystem. Freshwater Biology, 37, 1997, pp. 463-472.

TRPA, (Thomas R. Payne & Associates), RHABSIM (Riverine Habitat Simulation Software) V.3 en Español, Arcata (CA-EEUU), software comercial en <http://www.northcoast.com/~trpa/>, 2004.

Trujillo, C.M., Aproximación Teórica a los Criterios y Metodologías para la Determinación de un Caudal Ecológico, tesis Universidad de Antioquia (Instituto de Biología), Medellín, 1995.

Waddle, T., (ed.), PHABSIM for Windows: User's Manual and Exercises, U.S. Geological Survey. Fort Collins, Colorado, 2001. 288 pp.

World Commission on Dams (WCD), The Report of the World Commission on Dams, disponible en <http://www.dams.org>, 2000, pp. 369-382.



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA
SEDE BOGOTÁ
FACULTAD DE INGENIERÍA

EL PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN SOBRE ADQUISICIÓN Y ANÁLISIS DE SEÑALES PAAS-UN GRUPO
CATEGORIA "A" DE COLCIENCIAS

DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – SEDE BOGOTÁ

APOYA A LOS PROGRAMAS DE DOCTORADO, MAESTRÍA Y ESPECIALIZACIÓN
Con las Líneas de investigación:
Calidad de Energía, Descargas Eléctricas Atmosféricas, Alta Tensión.

INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS SOBRE:
Protección Contra Rayos, Transitorios Electromagnéticos, Calidad de la Potencia Eléctrica

Mayor información:
Tel: (57 1) 3165000 Ext. 18408, 18409, 18412, 18425, 18426 Fax: (57 1) 3165488, (57 1) 3165567
Bogotá, D.C., Colombia, Suramérica
<http://www.paas.unal.edu.co>