

DISEÑO ECO-HIDROLÓGICO DE PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS: EVALUACIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS

Juan Manuel Diez Hernández¹ & Sergio Olmeda Sanz²

1. Profesor-Investigador. Grupo de Hidráulica e Hidrología, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias - ETSIAA, Universidad de Valladolid - UVA, España

2. Investigador Asociado. Grupo de Hidráulica e Hidrología, ETSIAA - UVA, España.
jmdiez@iaf.uva.es

Recibido para evaluación: 16 de Mayo de 2008

Aceptación: 16 de Junio de 2008

Entrega de versión final: 14 de Julio de 2008

Resumen

La energía minihidráulica ha contribuido sustancialmente al progreso de los estándares de vida en el ámbito mundial con una tecnología de impacto ambiental relativamente bajo. Las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) son la posibilidad hidroenergética conveniente para Colombia, por lo que previsiblemente jugarán un papel capital en el aprovechamiento de su potencial hidrogenerador sobresaliente durante esta década. La normatividad relativa al licenciamiento de PCHs impone criterios de diseño hidrológico que consideran los requerimientos ecológicos de caudal en los tramos fluviales afectados por detracciones de caudal. El Caudal Ecológico (CE) debe ser considerado como una restricción ecosistémica al aprovechamiento hidroeléctrico, que puede ser evaluada satisfactoriamente mediante métodos confiables. Este trabajo presenta la tipología básica de procedimientos estimadores de CE, y describe la metodología reputada IFIM ("Instream Flow Incremental Methodology") con un caso real de re-licenciamiento. Se demuestra la posibilidad de compatibilizar la explotación hidroeléctrica con el mantenimiento de un estado ecológico aceptable, respetando unos CEs que pueden ser estipulados en Colombia con el marco analítico IFIM. Los nuevos criterios eco-hidrológicos evaluadores de caudales de servidumbre (ecológicos) en PCHs posibilitan aprovechamientos rentables económicamente y defendibles en términos ambientales.

Palabras Clave: Caudal Ecológico, Pequeña Central Hidroeléctrica, IFIM.

Abstract

The small hydroelectric energy has contributed substantially to the progress of the life standards in the world by means of a technology with a relatively low environmental impact. The Small Hydroelectric Plant (SHP) is the convenient type of hydro-energetic facility for Colombia, reason why it predictably will play a capital role in the exploitation of its excellent potential during this decade. The regulatory guidelines for the SHP relicensing enforce hydrological design criteria that incorporate the ecological requirements of discharge in the fluvial reaches affected by flow derivations. The Instream Flow (IF) should be considered as an ecological restriction to the hydroelectric use, which can be satisfactorily set with reliable approaches. This work shows the basic typology of IF assessment methods, describing the reputed "Instream Flow Incremental Methodology" (IFIM) with a case study of SHP relicensing. It also demonstrates the possibility of harmonize the hydroelectric operation with the maintenance of an acceptable ecological condition, preserving some IF that can be assessed with the IFIM analytic frame. The new eco-hydrological methods for IF setting facilitate SHP that are profitable and defensible in environmental terms.

Keywords: Instream Flow, Small Hydroelectric Plant, IFIM.

1. DESARROLLO HIDROENERGÉTICO A PEQUEÑA ESCALA Y GESTIÓN HÍDRICA AMBIENTAL

La energía hidroeléctrica ha coadyuvado sustancialmente a la mejora progresiva de los estándares de calidad de vida en el ámbito mundial, y previsiblemente seguirá jugando un papel decisivo en la generación eléctrica de bajo impacto medioambiental y social. El consumo eléctrico mundial durante la última década se ha incrementado un promedio del 3%, incluyendo una aportación de las fuentes hidroeléctricas en torno al 18% del total generado (UPME, 2007a).

El último Boletín Estadístico de Minas y Energía 2002-2007 (UPME, 2007a) presenta una tendencia creciente y equiparable en el consumo eléctrico colombiano desde el año 2000. Las fuentes hidráulicas representan actualmente el 67% del total de capacidad eléctrica instalada, y han experimentado un crecimiento interanual promedio del 4% en el período analizado. El sobresaliente potencial hidro-energético de Colombia evaluado en 25.000 MW (INEA, 1997), casi triplica la potencia instalada actual de 9000 MW presentada en el Plan Energético Nacional 2006-25 (UPME, 2007b). Teniendo en cuenta la contribución mayoritaria de las grandes centrales hidroeléctricas (95%) frente a las pequeñas (5%), se deduce que el potencial nacional de hidrogenación es explotado actualmente tan sólo un 34% en proyectos grandes y un 2% en centrales pequeñas.

Bajo esta premisa, la planificación hidroeléctrica nacional proyectada hasta 2025 (UPME, 2007b) destina muy poco desarrollo a las centrales de tamaño mediano a grande (sólo se registran tres proyectos de ejecución confirmada con capacidad total 1860 MW). Los escenarios y criterios analíticos que argumentan esta decisión han sido investigados por Smith et al. (2006), destacando inconveniencias críticas de esta tecnología en el contexto actual vinculadas a su: vulnerabilidad, competitividad limitada, y exigencia de recursos elevada. Sin embargo, las estrategias energéticas oficiales promueven el desarrollo importante de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH), siguiendo el enfoque conveniente de generación distribuida. Estas instalaciones con capacidad de generación máxima de 10 MW (Organización Latinoamericana Energía - OLADE) compiten con ventaja en los escenarios energéticos contemplados en la planificación colombiana (más seguras, rentables y

económicas), y lo hacen a un coste ecológico mucho menor. Por ello se conceptúan como la única posibilidad de futuro adecuada en el país. Prueba de ello son nuevos proyectos registrados en la UPME (julio 2007), fruto del interés creciente de los promotores hidroeléctricos en ampliar la cobertura minihidráulica en varios departamentos con hidrografías idóneas.

El desarrollo hidroeléctrico en el ámbito mundial no ha considerado suficientemente los efectos medioambientales asociados a las presas y PCHs, lo cual ha contribuido al deterioro actual de muchos sistemas fluviales. Prescindiendo de posibles justificaciones de las decisiones pasadas (basadas en criterios desarrollistas con sensibilidad ambiental limitada), resulta innegable que los nuevos proyectos de PCHs deberán incorporar de modo serio las implicaciones ecológicas de esta tecnología en expansión. El aprovechamiento hidráulico de un sistema fluvial puede resultar plenamente compatible con el mantenimiento de una integridad aceptable de los procesos ecológicos, lo cual precisa el análisis completo y equilibrado de los efectos ambientales. Este planteamiento conciliador de los diversos usos activos y pasivos del caudal fluvial, los cuales generalmente están contrapuestos (caudal de diseño - caudal ecológico), fundamenta la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH) promovida en el último Foro Mundial del Agua (México, 2006) como paradigma del desarrollo global sostenible. El marco normativo Colombiano incorpora acertadamente esta reivindicación de un manejo fluvial verdaderamente ambiental en varios códigos. El diseño ecológico de PCHs es contemplado globalmente en el procedimiento de licenciamiento ambiental (Corporaciones Regionales) que estipula el Decreto 1753 (3/8/1994) para los proyectos con capacidades instaladas hasta 100 MW (Art.8.4). Específicamente, el requerimiento ambiental clave en una PCH de mantener un Caudal Ecológico se aborda en algunas disposiciones complementarias, como la Resolución explicativa del Índice de Escasez (Min. Ambiente, 2004) y el Proyecto de Ley del Agua (Min. Ambiente, 2005; Art. 21).

Los contextos energético y socioeconómico actuales de Colombia favorecen el previsible desarrollo relevante de la energía minihidráulica en los próximos años. La PCH es una tecnología energética promisoría en este país con notable potencial hidroeléctrico inaprovechado, debido a sus ventajas en términos

económicos, ambientales, y preventivos del cambio climático. La optimización clásica de una PCH analiza la inversión en términos de los costes y beneficios vinculados a su capacidad energética, la cual está determinada por un Caudal de Equipamiento definido mediante unos criterios productivos (caudal-salto) que han sido poco restrictivos con las necesidades ecológicas de caudal en la práctica. Sin embargo, la evaluación hidroenergética en el marco de la GIRH considera los efectos ambientales de una alteración del régimen de caudales, al incorporar una demanda hídrica medioambiental expresada por su Régimen de Caudales Ecológicos, el cual puede limitar el volumen turbinable.

Un enfoque referencial para la evaluación del potencial a pequeña escala en Colombia es el desarrollado por Ortiz Flórez (2006), cuya aplicación en la costa pacífica ilustra un marco lógico para incluir las restricciones ecológicas de caudal en el diseño ambiental de PCHs que propugna el Plan Energético Nacional.

2. EFECTOS AMBIENTALES DE LAS PCHS EN EL ECOSISTEMA FLUVIAL

Las repercusiones ambientales de una PCH dependen del tipo de aprovechamiento y del grado de explotación, pero los efectos básicos de una modificación del régimen de caudales son comunes a los distintos esquemas operativos. Las consideraciones siguientes se refieren a una típica PCH fluyente con derivación (a filo de agua) de media y alta caída, la cual ilustra de modo conveniente las perturbaciones ecohidrológicas asociadas también a otras variantes de central (sin derivación, o bien con regulación). El esquema ordinario (Figura 1) desvía el flujo mediante un azud, el cual provoca el remanso adecuado para efectuar la toma protegida mediante una rejilla. El sistema alternativo de toma sumergida minimiza el impacto sobre la movilidad de los organismos acuáticos, pero no evita el cambio del régimen hidrológico. Dependiendo de la topografía, puede ser necesaria la construcción de un canal de derivación que transporte el agua hasta la cota precisa para la generación diseñada. El tanque de presión y un desarenador conducen el caudal a una tubería a presión que finaliza en la casa de máquinas, donde se ubican los generadores. El agua turbinada se restituye al río de forma ordenada a través del canal de descarga.

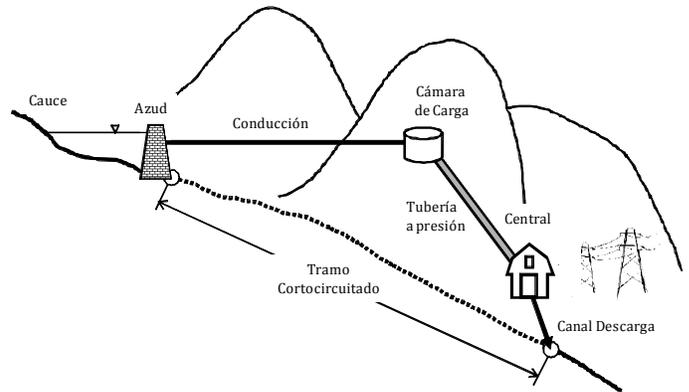


Figura 1. Esquema de un aprovechamiento hidroeléctrico fluyente con derivación. El diseño hidrológico ambiental asegura en el tramo fluvial cortocircuitado un Caudal Ecológico, preservador de una condición aceptable del ecosistema acuático.

El diseño hidro-ecológico de PCH estudia un componente crucial, que es el tramo fluvial cortocircuitado entre el lugar de toma y el punto de restitución, cuyas condiciones hidráulicas durante la operación de la central (velocidad, área hidráulica, y capacidad de transporte) deben ofrecer una calidad de hábitat suficiente para el funcionamiento aceptable del ecosistema acuático. Este fragmento fluvial con "bypass" recibe directamente los impactos vinculados a la detración de flujo sobre la biocenosis acuática, los cuales menoscaban su capacidad biogénica global y alteran su composición, estructura y funcionamiento. Para su descripción, estos efectos ecológicos se agrupan en la Figura 2 como asociados a las reducciones de: volumen, velocidad, profundidad, y anchura (Biggs, 1982).

La reducción del volumen circulante restringe la capacidad de disolución y asimilación de nutrientes, materia orgánica, y sustancias tóxicas. El consiguiente enriquecimiento de nutrientes (N y P) estimula la proliferación inicial de perifiton, pero a largo plazo reduce la diversidad de especies. En consecuencia, los macroinvertebrados dispondrán de una fuente alimenticia menos heterogénea, y por lo tanto de menor calidad (Quinn y Hickey, 1990). El incremento de materia orgánica intensifica la actividad microbiana, la cual cercena el suministro de Oxígeno Disuelto (OD) para los invertebrados y peces, afectando a sus niveles de diversidad y biomasa (Hynes, 1970). Cuando existe abundante biomasa vegetal en la corriente, se acentúan las variaciones diurnas en la concentración de OD,

debido a la mayor actividad fotosintética de las plantas acuáticas de día. Conocido el papel crítico del OD en la salud del ecosistema, y que sus niveles óptimos están próximos a la saturación (8-10 g/m³), el ascenso de la tasa respiración-fotosíntesis por unidad de volumen de corriente puede reducir el número de especies

invertebradas, a favor de otras más tolerantes con menor valor ecológico (Biggs, 1981). Finalmente, cabe destacar el efecto conjunto de las alteraciones anteriores del OD en la concentración de nitrógeno amoniacal, que puede provocar condiciones de amonio infractoras de las directrices ambientales.

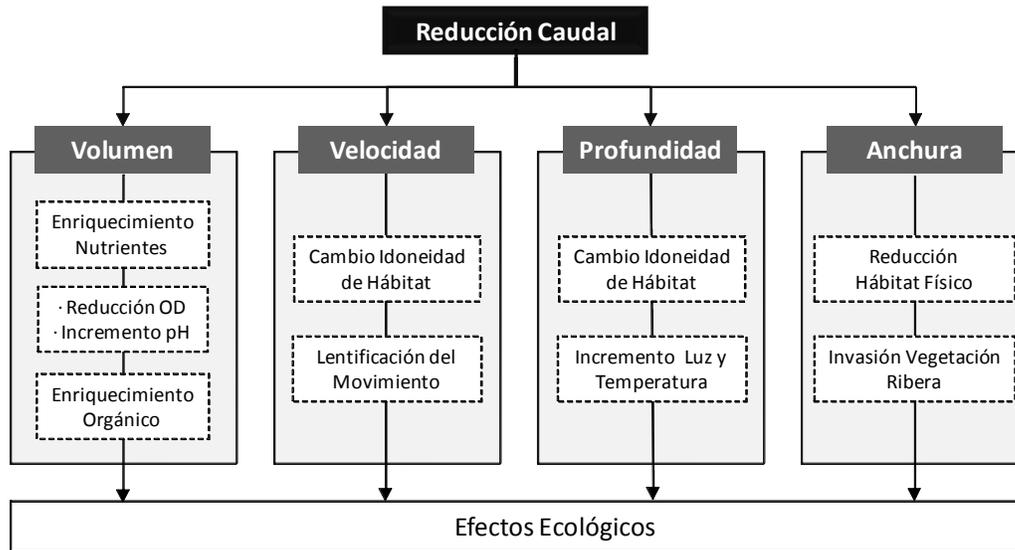


Figura 2. Efectos de la reducción de caudal en las condiciones del hábitat fluvial disponible para las comunidades biológicas. (Modificado Biggs, 1982)

Las respuestas biológicas causadas por la lentificación del flujo consisten en perturbaciones de los mecanismos de alimentación, movilidad, alimentación y fisiológicos (Ward y Standford, 1995). La acción combinada de la uniformización de los campos de velocidad, la reducción de la turbidez y la mejora de la estabilidad del lecho, puede favorecer el desarrollo de plantas acuáticas, invertebrados y peces. Sin embargo, la falta de variabilidad temporal de caudal en el tramo cortocircuitado disminuye la diversidad del hábitat físico, de modo que la nueva idoneidad empeorada puede impedir la presencia de algún organismo.

El flujo remanente más somero durante los ciclos de turbinado dificulta la franqueabilidad del fragmento fluvial fragmentado. Al ser la migración un proceso esencial y crítico en el ciclo vital de muchos peces, la circulación de un flujo de servidumbre insuficientemente profundo puede poner en peligro algunas estrategias vitales. La combinación de este efecto con el obstáculo real que supone el azul, resultaría dramática en PCH sin medidas correctoras adecuadas. Adicionalmente, los campos de velocidad ralentizados entorpecen la alimentación y refugio de la

avifauna, alteran la deriva de los invertebrados, y dificultan el desove de la ictiofauna. La extracción incrementa la temperatura del agua y la entrada de luz, cuyas repercusiones en el ecosistemas son sustanciales (Allan, 1995). Por último, el estrechamiento de la corriente rebaja la superficie de hábitat utilizable por los organismos. La invasión del cauce por la vegetación ribereña estimula distintos efectos biológicos positivos y negativos, en ocasiones relativamente equilibrados (Biggs, 1981).

En síntesis, las respuestas biológicas a la detracción de caudal en el tramo cortocircuitado de una PCH son similares a las motivadas por los cambios hidrológicos naturales, pero de mayor intensidad, duración y frecuencia. Si las modificaciones fuesen muy marcadas, podrían alterar los procesos ecológicos de modo permanente (alimentación, reproducción, refugio, competencia, etc.): para evitarlo, el diseño hidrológico de PCH debe cimentarse en un Caudal Ecológico que mantenga el buen estado ecológico global exigido en la reglamentación ambiental.

3. EVALUACIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS EN PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

La dificultad esencial de la determinación de Caudales Ecológicos (CE) estriba en identificar el grado de captación de caudal compatible con el desarrollo normal de los procesos ecológicos fluviales. Aunque en el ámbito mundial se ha investigado mucho sobre los efectos ambientales de la regulación de caudales y la estimación de reservas hídricas ambientales, existe muy poca información científica sobre los requerimientos hidráulicos de las principales especies fluviales colombianas. Obviamente, el análisis de los requerimientos ecológicos de caudal en los ríos de Colombia resulta laborioso por su destacada biodiversidad, pero es una tarea imperiosa que debe acometerse con metodologías científicas acreditadas y enfocadas adecuadamente para el licenciamiento de PCH en el contexto de la Evaluación Estratégica Ambiental. Una definición reciente y apropiada del concepto de Caudal Ecológico en ríos de Colombia es la explicitada en la debatida propuesta de Ley de Agua (Min. Ambiente, 2005): "... los caudales mínimos que deberán mantener las corrientes superficiales en sus diferentes tramos, a fin de garantizar la conservación de los recursos hidrobiológicos y los ecosistemas asociados" (Art. 21).

Dos enfoques simples que han sido considerados en Colombia para evaluar los CE están incorporados en el procedimiento de cálculo del Índice de Escasez (Min. Ambiente, 2004): 1) el primero computa el caudal medio diario promedio de 5-10 años cuya duración es igual o mayor del 97.5%, el cual se comprueba asociado a una recurrencia de 2.3 años. 2) El segundo recomienda un CE como un porcentaje en torno al 25% del caudal medio mensual multianual menor de la corriente. Con una concepción similar, la proposición de Ley de Agua concretaba como CE el valor de permanencia en la fuente durante el 90% del tiempo (Art.21). Este trabajo demostrará que las aproximaciones al CE ecológicamente simplistas como las anteriores son perfeccionables, si se incorpora de modo explícito las exigencias de hábitat de los organismos acuáticos mediante una relación funcional entre el caudal y la condición ecológica del río.

Los métodos propuestos para asignar reservas ambientales de caudal en el mundo son numerosos: hace una década se contabilizaban más de 200 en unos 50

países (Statzner y Capra, 1997), y el conjunto ha ido en aumento. Una descripción de las técnicas principales se encuentra en los trabajos de Díez Hernández (2005a;2005b). Seguidamente, se resumen las aproximaciones más utilizadas, ordenadas según la tipología convencional.

3.1. Métodos Hidrológicos

Estos procedimientos deducen el CE a partir de tratamientos estadísticos diversos de la serie de caudales naturales representativa. Se han aplicado en el mundo varias docenas de métodos diversos, desarrollados para tramos fluviales concretos. De hecho la Asociación Europea de Pequeña Hidroeléctricidad (ESHA, 2008) destaca una corta selección de veinte métodos recogidos en los códigos reguladores de la Unión Europea. Esto demuestra que no existe una solución universal confiable de este tipo. Los criterios normativos colombianos descritos pertenecen a este tipo de aproximaciones, que expresan generalmente el CE mínimo como la descarga asociada a un percentil de la Curva de Caudales Clasificados (CCC), un porcentaje de un estadístico de tendencia central, o bien un período de retorno.

Por la utilidad de la CCC en la evaluación de la potencia instalada y energía generada en una PCH, citaremos algunos casos ilustrativos. En Austria se ha calculado el CE como el 20% del Q_{300} (caudal superado 300 días al año), como el Q_{347} , y también mediante fórmulas basadas en el Q_{300} en función del rango de caudal. En Reino Unido el CE ha sido calculado promediando los Q_{307} de los años hidrológicos seco y húmedo. Un criterio aceptado en Alemania obtiene el CE como el cociente entre el Q_{361} y el caudal mínimo mensual máximo del año hidrológico normal. El criterio Estadounidense algo más exitoso denominado "Nothern Great Plains Resource Program" (NGPRP, 1974) computa un CE distinto para cada mes, como el Q_{328} de la CCC mensual correspondiente, excepto en el período más caudaloso que asigna el Q_{183} . Estos enfoques precisan unos conocimientos técnicos y datos de entrada relativamente muy simples, lo cual ha motivado su aplicación profusa en contextos reguladores hidroeléctricos de escasa controversia y a distintas escalas operativas. Sin embargo, la rigidez de sus fórmulas y su escasa vinculación ecológica confieren una resolución baja e incertidumbre significativa, que limitan la transferibilidad a condiciones disimilares a las que fundamentaron sus desarrollos.

3.2. Métodos Hidráulicos

Los procedimientos agrupados en esta categoría examinan los cambios de alguna variable hidráulica simple con el caudal, en secciones transversales representativas de fragmentos fluviales críticos por su relevancia ecológica. El licenciamiento de PCH en Europa y EEUU ha considerado el CE preciso para que los rangos combinados de profundidad y velocidad puntuales en el tramo cortocircuitado respeten unas restricciones ecológicas predefinidas en cada ámbito geográfico: verbigracia, Alemania ($p > 10$ cm; $v > 30$ cm/s), EEUU ($p > 12$ cm; $v > 12$ cm/s), o Austria ($p > 20$ cm; $v > 15$ cm/s). Otro criterio ampliamente utilizado escruta la variación del "Perímetro Mojado" con el caudal en los ambientes restrictivos de "rápidos", bajo la premisa de una relación lógica entre la disponibilidad de hábitat físico y el área mojada del biotopo (Nelson, 1980). En cualquier caso, los criterios hidráulicos no pueden evaluar el efecto de la intensidad de la detración, ni de la longitud del tramo fluvial afectado. Además, sus resultados se han comprobado inconsistentes en bastantes casos, e irreales en corrientes muy anchas o muy estrechas (Tunbridge, 1988). Estas limitaciones explican que la Asociación Europea de PCH critique estos enfoques por su baja confiabilidad y aplicabilidad.

3.3. Modelos de Simulación Eco-hidráulica del Hábitat Fluvial

Los inconvenientes asociados a los métodos elementales anteriores (fiabilidad, transferibilidad, y correspondencia ecológica) han estimulado el desarrollo de herramientas avanzadas para la formulación de directrices evaluadoras de caudales ambientales. Los conceptos y técnicas de la emergente Hidráulica Ecológica (Eco-hidráulica) han posibilitado la evaluación cuantitativa y cualitativa del hábitat acuático utilizable para unas especies acuáticas objetivo o conjunto de ellas (normalmente peces y/o macroinvertebrados), bajo regímenes hidrológicos múltiples y escenarios biológicos configurables. La simulación espacial del micro-hábitat en un fragmento fluvial combina los campos de variables hidráulicas determinantes ecológicamente (velocidad, profundidad, material del lecho, etc.) con los criterios de preferencia de los organismos objetivo, para desarrollar unas relaciones funcionales entre el Caudal y un Índice de Hábitat, de las cuales derivan los regímenes de caudales ecológicos. El sistema de esta naturaleza más empleado y acreditado científicamente en el ámbito mundial para

determinar descargas ambientales es la metodología "IFIM" ("Instream Flow Incremental Methodology"), impulsada por el Servicio Estadounidense de Pesca y Vida Silvestre (USFWS; Bovee y Milhous, 1978) como una plataforma estándar para la planificación hídrica superficial con base ecológica. IFIM es un marco operativo hidrocientífico que coordina enfoques de las facetas ecológicas de la Hidráulica e Hidrología, cuya finalidad es evaluar las implicaciones biológicas de cambios incrementales de caudal en la calidad del agua, la estructura del cauce y la disponibilidad de hábitat utilizable.

IFIM se viene utilizando con éxito desde hace unas más de dos décadas para determinar caudales ecológicos en el licenciamiento de centrales hidroeléctricas en contextos de normatividad avanzada. La primera legitimación de IFIM se produce a principios de los años noventa por la Corte Suprema de EEUU, como un método defendible para concertar las utilidades de recurso hídrico (Stalnaker et al., 1995). Desde entonces, IFIM ha sido aplicada para determinar los caudales ecológicos de PCH en un número creciente de países. En Europa continuará siendo un criterio primordial en las concesiones minihidráulicas, habida cuenta de las exigencias ambientales intensas de su Directiva Marco de Aguas (OJEC, 2000), que obliga a los países miembros a lograr un "buen estado ecológico" en sus hidrosistemas continentales antes de 2015. Obviamente, el régimen de CE es un componente ambiental imprescindible para salvaguardar el potencial biológico de los tramos fluviales abastecedores de PCHs. La potencialidad de IFIM en los ríos de Colombia es importante, como lo demuestran el interés creciente de los científicos, y los resultados esperanzadores de su aplicación pionera en la derivación del río Palacé (Cauca) vinculada al nuevo acueducto de Popayán (Diez Hernández y Ruiz Cobo, 2007). Por su conveniencia para el licenciamiento de PCHs en Colombia, se describe más adelante el procedimiento operativo de una simulación IFIM de caudales ecológicos típica, ilustrado con la información de un caso real.

3.4. Enfoques Holísticos

Para consensuar CE en ríos con utilidades hídricas diversas y contrapuestas, se han desarrollado procedimientos negociadores que valoran las exigencias hidrológicas de cada uno de los componentes del hidrosistema: abióticos (calidad del agua, geomorfología, etc.), bióticos (fauna, flora),

paisajísticos, culturales, sociales, y económicos. Más que métodos para calcular un CE, son marcos lógicos de búsqueda de soluciones, que consideran los dictámenes elaborados por equipos multidisciplinares de especialistas a partir de una información con cierto detalle. Dos metodologías extendidas son la Sudafricana BBM ("Building Block Methodology"; King et al., 2000), y la Australiana AHA ("Australian Holistic Approach; Arthington et al., 1992). Los contextos que rigen la evaluación ambiental de PCHs son por lo general simples, conformados por el antagonismo entre la generación energética y la conservación ambiental, por lo que pueden decidirse con actuaciones más sencillas.

4. ANÁLISIS IFIM DE CAUDALES ECOLÓGICOS EN PCHs

El procedimiento operacional y analítico de una modelación IFIM genérica se pormenoriza en los textos oficiales (Bovee y Milhous, 1978; Bovee et al., 1997). Un autor de este artículo ha investigado la capacidad de IFIM para ríos de Colombia, presentando en recientes trabajos las pautas básicas para su aplicación en cuanto al protocolo de caracterización (Diez Hernández, 2006), simulación hidráulica (Diez Hernández y Burbano, 2007), criterios biológicos (Diez Hernández y Ruiz Cobo, 2007), y ejecución informatizada con el software RHABSIM© desarrollado ex profeso en Español (Payne y Diez Hernández, 2005).

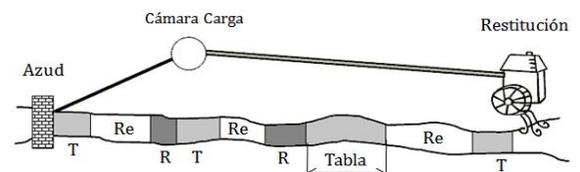
Seguidamente, se sintetizan las fases de IFIM, ilustradas con resultados extraídos del estudio elaborado por Olmeda Sanz y Diez Hernández (2005) para el re-licenciamiento de una PCH del tipo de la Figura 1 ubicada en el río Mandeo (La Coruña, España. UTM 574545E - 4789216N). La central posee un salto bruto de 187 m, y opera con 2 turbinas Francis en el intervalo de caudales entre el mínimo técnico de 7 m³/s y el valor nominal de 17.5 m³/s. La hidrología natural suministra un módulo anual medio de 8.71 m³/s, con caudales medios mensuales de 1.57 m³/s a 18.08 m³/s. El tramo fluvial cortocircuitado tiene una longitud aproximada de 6.5 km y conduce un CE autorizado equivalente al 12% del módulo interanual (66% del caudal mensual mínimo). Con esta restricción ambiental laxa, la potencia instalada (14.4 MW) posibilita una generación bruta interesante (87026 MW/h en 2005). Sin embargo, el nuevo planteamiento IFIM ha conformado un régimen de caudales más defendible en términos ecológicos. Debe destacarse que la central tiene

una cierta capacidad de regulación (depósito), pero aunque no sea estrictamente fluente, las consideraciones sirven para ilustrar el procedimiento conveniente.

4.1. Protocolo de Caracterización Fluvial

El sistema de representación del cauce de IFIM inventaría y tipifica los diferentes hábitats hidráulicos con relevancia ecológica. Una tipología general diferencia entre: rápidos, tablas, y remansos (Fig. 3a). Como referencia para ríos pequeños, la corriente en los rápidos es somera (<30 cm) y agitada (>30 cm/s), en los remansos es lenta (>30 cm/s) y profunda (>60 cm), y en las tablas es intermedia. La ecohidráulica de cada tipo de hábitat se representa mediante suficientes secciones transversales levantadas hidrotopográficamente (14 en este caso). Cada sección se subdivide en múltiples celdas paralelepípedas, que representan de modo mejorado el micro-ambiente hidráulico que perciben los organismos acuáticos (Fig. 3b). En cada sección se identifica la distribución del material del lecho, y se registra la siguiente información hidrométrica mínima (Diez Hernández, 2005b): 1) las cotas de agua durante tres descargas representativas del rango hidrológico, 2) la distribución horizontal de velocidades puntuales durante la mayor descarga medible de modo seguro.

a) Inventariación Fluvial



b) Discretización del Cauce

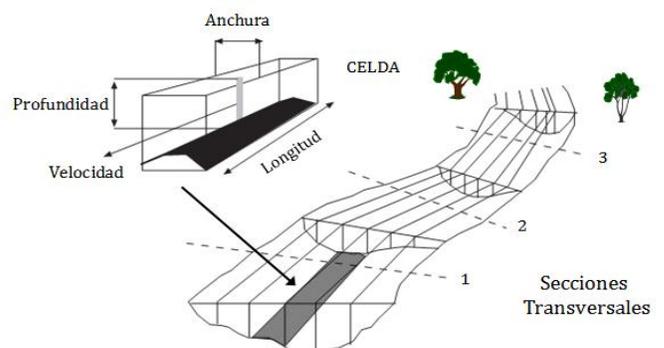


Figura 3. Sistema de caracterización fluvial de IFIM. a) Inventariación de hábitats fluviales. b) Discretización del dominio en celdas computacionales paralelepípedas.

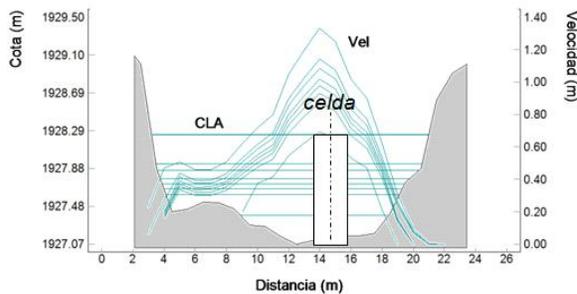
4.2. Modelamiento Espacial del Microhábitat Fluvial

La evaluación del hábitat se construye sobre los campos hidráulicos simulados en el dominio fluvial de las variables seleccionadas con significación ecológica. Normalmente, se predicen en cada celda las velocidades, las profundidades y el material de lecho, asociados a múltiples caudales dentro del rango de ocurrencia normal (Fig. 4a). Existen diversos métodos numéricos predictivos del micro-hábitat hidráulico, si bien generalmente se resuelven esquemas clásicos 1D para regímenes permanentes uniformes o variados, calibrados con los registros de campo. Así se hizo en el Mandeo, donde primero se simularon las profundidades en las celdas, a partir de curvas de calibración derivadas del modelo de Manning. Con esas predicciones se resolvieron en cada celda regímenes uniformes, utilizando la rugosidad como factor de calibración.

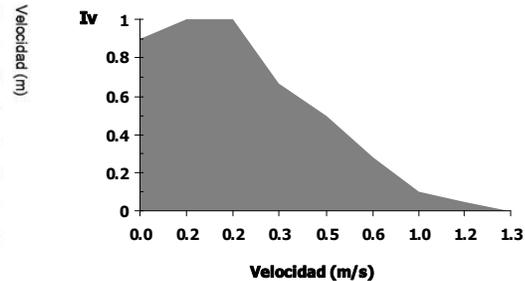
El modelo biológico de preferencia del entorno hidráulico son las Funciones de Preferencia, que expresan el grado de idoneidad de las variables hidráulicas que conforman el hábitat para los organismos objetivo, mediante un coeficiente que varía entre cero (inadecuado) y uno (óptimo). El organismo objetivo debe representar la estructura del ecosistema natural, cuya afectación se pretende minimizar. La especie autóctona con preferencias conocidas más representativa y exigente del Mandeo es la trucha (*Salmo trutta*), que reside y desova en el sector (Fig. 4b).

Combinando los campos hidráulicos simulados con las curvas de preferencia correspondientes, se desarrollan las relaciones funcionales decisivas entre el Caudal (Q) y un Índice de Hábitat (IH) evaluador de la calidad global del tramo. En síntesis, el IH para una condición de caudal agrega la contribución de todas las celdas del dominio mediante la siguiente expresión: $IH = \sum (Cvi$

a) Modelo Hidráulico



b) Modelo Biológico



c) Modelo Eco-Hidráulica del Hábitat

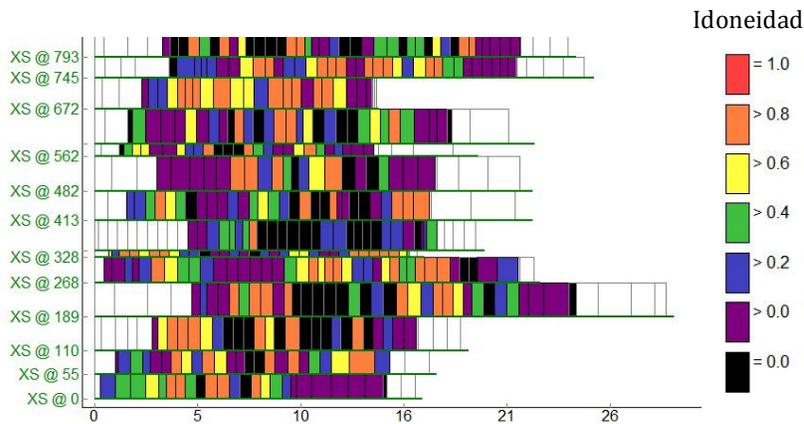


Figura 4. Modelamiento IFIM del tramo cortocircuitado de la PCH del río Mandeo (España). a) Simulación hidráulica en una sección transversal de profundidades y velocidades. b) Modelo biológico de preferencia de velocidad de la trucha (*Salmo trutta*) según García de Jalón (1999). c) Evaluación espacialmente distribuida de la idoneidad combinada del microhábitat acuático (velocidad, profundidad y material del lecho).

· Cpi · Cmi) Ai. La agregación estándar multiplicativa de las idoneidades de cada celda (i) debidas a la velocidad (Cvi), la profundidad (Cpi), y el material del lecho (Cvi), se pondera por el área de cada elemento computacional (Ai) (Fig. 4c). La integración de todos los caudales y las preferencias de los organismos analizados produce las conocidas funciones Q-IH (Fig. 5a), las cuales manifiestan en este caso el rango de flujos óptimos para los cuatro estadios de la trucha (entorno de los picos de las curvas).

4.3. Análisis Temporal del Caudal Ecológico

En esta última fase se valoran las distintas alternativas propuestas por los colectivos implicados en la gestión de un tramo fluvial, en términos de factibilidad, efectividad, riesgo y economía. Para que la solución

de gestión de caudales adoptada tenga éxito, es preciso que satisfaga de modo razonable los intereses de todos los actores del proceso negociador. La PCH del Mandeo involucra las dos posturas típicas y generalmente confrontadas que rigen este tipo de proyectos. 1) El promotor hidroeléctrico pretende mantener (o aumentar) el caudal turbinable autorizado, con criterios de rentabilidad económica. 2) El ámbito protector hidrobiológico persigue la mínima afección ecológica del río, con criterios de conservación ambiental. A modo de ejemplo, se comparan la línea base hidroológica (natural) con las alternativas más alejadas, y se diseña un Régimen de CE (RCE) razonable que mantiene la utilidad de la PCH.

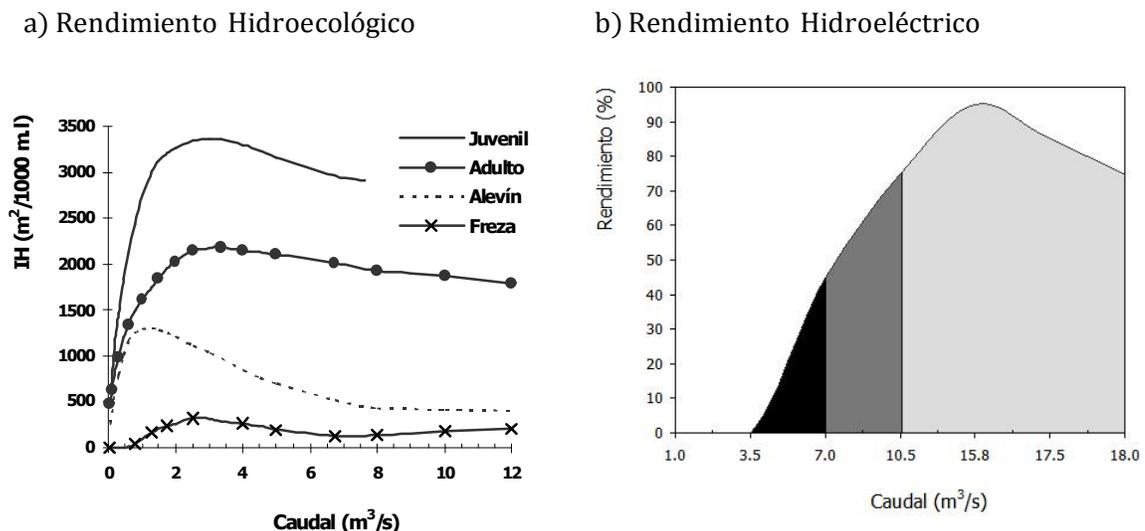


Figura 5. Evaluación comparada de las eficiencias ecológica e hidráulica del tramo turbinado del río Mandeo (España). a) Rendimiento ecohidráulico de producción de hábitat. b) Rendimiento hidroeléctrico de las turbinas Francis: la zona negra es inviable técnicamente (<60% del Caudal Nominal).

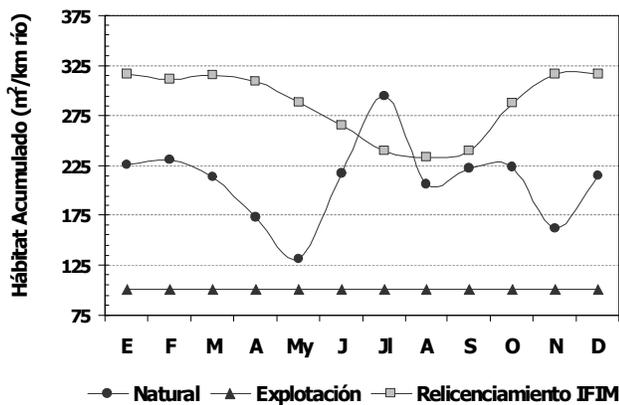
La Tabla 1 muestra los regímenes de caudales analizados. La explotación actual está limitada por un CE muy bajo (1.04 m³/s), y opera en el intervalo de caudales viables técnicamente (>7 m³/s, Fig. 5b). La solución adoptada con IFIM para el re-licenciamiento considera los intervalos óptimos de CE para los cuatro estadios de la trucha (95% al 100% de los picos de las curvas), durante los períodos que ocupan el tramo. En consecuencia, se trata de un RCE perfeccionado, con caudales variables en el tiempo y optimizados para emular mejor la fenología natural, en lugar de un CE invariable que es infrecuente en la naturaleza. La

prescripción para el período reproductivo (Nov. - Ene.) impone el CE óptimo para la freza (2.4 m³/s), habida cuenta de su vulnerabilidad. El caudal durante el estiaje (Jul. - Sept.) debe superar el valor natural mínimo (1.80 m³/s), lo cual supedita la operatividad de la central durante ese período. Octubre es una transición entre el estiaje y el desove, por lo que se recomienda un CE intermedio (2.2 m³/s). Durante el período que comprende el desarrollo embrionario, eclosión, alevinaje, y descenso posterior al desove (Feb. - Mar. - Abr.) se recomiendan los CE optimizados para los alevines y juveniles (2.3 m³/s - 2.2 m³/s - 2.1 m³/s).

Tabla 1. Caudales aprovechables por la PCH para tres alternativas hidrológicas fundamentales: Régimen natural (línea base), explotación previa, y propuesta IFIM para el nuevo licenciamiento. En negrita el período técnicamente viable (>7 m³/s).

	E	F	M	A	My	J	Jl	A	S	O	N	D
Línea Base Régimen Natural	17.4	18.1	13.7	10.1	7.7	4.7	2.3	1.6	1.7	4.6	9.4	14.0
Explotación CE=1.04 m ³ /s	16.4	17.1	12.7	9.1	6.7	3.6	1.2	0.5	0.6	3.5	8.4	13.0
Relicencia IFIM CE (2.0-2.7m ³ /s)	15.0	15.8	11.5	8.0	5.7	2.8	-	-	-	2.4	7.0	11.6

a) Series Temporales de Hábitat



b) Curvas Características de Caudales

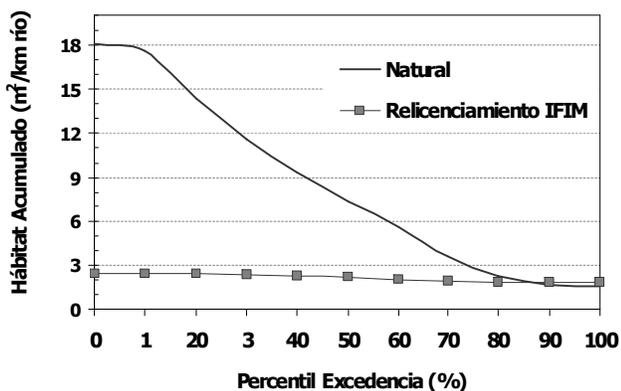


Figura 6. Análisis de alternativas en un estudio IFIM. a) Series Temporales de Hábitat correspondientes a la línea base, explotación, y re-licenciamiento. b) Curvas Características de Caudales de la línea base y del Régimen de Caudales Ecológicos prescrito con IFIM.

Analizando las Curvas Características de Caudales de la línea base y del RCE (Fig. 6b), se comprueba que los criterios de re-licenciamiento salvaguardan con seguridad la rentabilidad de la PCH. En definitiva, la metodología IFIM ha posibilitado el diseño de un régimen operativo de la central factible, viable económicamente, y defendible con criterios ecológicos acreditados. Es innegable que la nueva solución ambiental disminuye de modo perceptible la capacidad generadora de la PCH, y en consecuencia el beneficio productivo. Sin embargo, también es cierto que la Gestión Hídrica Integral promovida en Colombia apuesta por unos aprovechamientos hidroeléctricos más respetuosos con el medio ambiente.

5. CONCLUSIONES

La energía minihidráulica posee un potencial notable en el ámbito mundial, y Colombia dispone de numerosas localizaciones idóneas para la instalación de PCH. El desarrollo hidroenergético a pequeña escala en el ámbito de la Gestión Integral del Recurso Hídrico debe incorporar unas premisas ambientales sólidas, de las que deriven unos Regímenes de Caudales Ecológicos (RCE) eficaces. Los planteamientos avanzados para estipular RCEs se alejan de las aproximaciones simplistas del ecosistema asociadas a cálculos estadísticos rebatidos científicamente. El sistema contrastado más aplicado mundialmente para evaluar requerimientos ecológicos de flujo (RCE) en PCHs es la metodología IFIM. El potencial resolutivo del procedimiento IFIM en ríos de Colombia es interesante, y puede ser configurado adecuadamente para las particularidades de sus sistemas fluviales de alta biodiversidad. El caso revisado en este trabajo

corroborar que es posible compatibilizar el aprovechamiento del caudal fluvial para generación hidroeléctrica con el mantenimiento de un estado ecológico global aceptable, respetando unos RCEs que pueden ser determinados científicamente con IFIM.

Las consideraciones anteriores sugieren el empleo de modelos ecohidráulicos de simulación del hábitat para la evaluación de caudales ecológicos en el procedimiento de licenciamiento de PCHs en Colombia. La investigación deberá orientarse hacia la particularización de IFIM para las características ambientales locales, abordando los siguientes aspectos que consideramos cruciales. 1) Desarrollar curvas de preferencias para organismos objetivo (peces y/o macroinvertebrados), representativos de unos ecosistemas fluviales que deben ser mejor conocidos. 2) Recomendar los modelos hidráulicos idóneos para el análisis de tramos fluviales de alta pendiente, cuya calibración es exigente en términos de instrumentación y datos de campo precisos. 3) Diseñar técnicas para incorporar las características hidrológicas que limitan el desarrollo y sostenibilidad de sus biocenosis acuáticas (condiciones del niño y la niña).

BIBLIOGRAFÍA

1. Allan, J.D., 1995. Stream Ecology Structure and function of running waters. Chapman & Hall. New York.
2. Arthington, A.H., et al., 1992. Development of an holistic approach for assessing environmental flow requirements of riverine ecosystems. En: Pigram, J.J.&Hooper, B.P. (eds.): Proceedings of an International Seminar and Workshop on Water Allocation for the Environment:69-76. Armidale, Australia.
3. Biggs, F.J.F., 1981. A summary of the effects of low Flow regulation on river ecology. En: Water & Soil Science Center, No. WS346.
4. Bovee, K.D., 1997. Data Collection Procedures for the Physical Habitat Simulation System. U.S. Geological Survey, Mid-Continent Ecological Science Center. Fort Collins, Colorado.
5. Bovee, K.D. y Milhous, R. T., 1978. Hydraulic simulation in instream flow studies. Instream Flow Information Paper No. 5. U.S. Fish and Wildlife Service, FWS/OBS-78/33.
6. Díez Hernández, J.M., 2005a. Bases metodológicas para el establecimiento de caudales ecológicos en el ordenamiento de cuencas. En: Ingeniería y Competitividad, 7 (2): pp. 11-18.
7. Díez Hernández, J.M., 2005b. Análisis Comparativo de los métodos de simulación hidráulica en PHABSIM. ProQuest-Information and Learning, Madrid, España.
8. Díez Hernández, J.M., 2006. Técnicas avanzadas para la evaluación de caudales ecológicos en la ordenación sostenible de cuencas hidrográficas. En: Ingeniería e Investigación, 26 (1): pp. 58-68.
9. Díez Hernández, J.M. y Burbano Burbano, L., 2007. Revisión de los modelos eco-hidráulicos 1D y 2D en corrientes fluviales. En: Avances en Recursos Hidráulicos, 15: pp. 75-88.
10. Díez Hernández, J.M. y Ruiz-Cobo, D.H., 2007. Determinación de caudales confiables en Colombia: el ejemplo del río Palacé (Cauca). En: Gestión y Ambiente, 10 (1): pp. 81-92.
11. ESHA (European Small Hydropower Association), 2008. Reserved Flow: short critical review of the methods of calculation. En: www.esha.be.
12. García de Jalón, D., 1999. Medidas correctoras en minicentrales hidroeléctricas. En: Manual práctico sobre minicentrales hidroeléctricas. AEMS. Madrid, España. pp: 47-66.
13. Hynes, H.B.N., 1970. The ecology of running waters. Liverpool University Press. Liverpool, Reino Unido. 555 P.
14. INEA. 1997. Guía de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas. Ministerio de Minas y Energía de Colombia. Disponible en: www.upme.gov.co.
15. King, J.M., Tharme, R.E. y De Villiers, M.S., 2000. Environmental flow assessments for rivers. Freshwater Research Unit. University of Cape Town. WRC Report No: TT131/00.
16. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, 1994. Decreto 1753 del 3 de Agosto de 1994 por el que se reglamentan parcialmente los Títulos VIII y XII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales.
17. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, 2004. Resolución 0865 de 2004. En: www.miniambiente.gov.co.
18. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, 2005. Proyecto de Ley del Agua (borrador). En: www.miniambiente.gov.co.

19. NGPRP (Northern Great Plains Resource Program), 1974. Instream Needs Subgroup Report: Work Group C, Northern Great Plains Resource Program. USFWS, Washington DC.
20. Nelson, F., 1980. Evaluation of Four Instream Flow Methods Applied to Four Trout Rivers in Southwest Montana, Montana Dept. Fish Wildlife and Parks Report .
21. OJEC (Official Journal of the European Communities), 2000. Directiva 2000/60/EC del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de Octubre 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.
22. Olmeda Sanz, S. y Diez Hernández, J.M., 2005. Pautas para el establecimiento de un régimen de caudales ambientales en el río Mandeo. IV Congreso Forestal Español (CD), Zaragoza, España, pp. 26-30.
23. Ortiz Flórez, R., 2006. Método para la evaluación de los recursos hidroenergéticos en pequeña escala. Actas XVII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología (CD). Popayán, Colombia. pp.15-16.
24. Payne, T.R. y Diez Hernández, J.M., 2005. Actualización del Modelo RHABSIM 3.0 para estimar caudales ecológicos. En: Revista EIDENAR, 111, 1(3): pp. 12-17.
25. Quinn, J.M. y Hickey, C.W., 1990. Magnitude of effects of substrate particle size, recent flooding and catchment development of benthic invertebrate communities in 88 New Zealand rivers. En: New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 24: pp. 411-427.
26. Smith, R.A., Vesga, D.R., y Cadena, A., 2006. El futuro de la hidroelectricidad: escenarios energéticos para Colombia. Actas XVII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología (CD). Popayán, Colombia. pp. 15-16 .
27. Stalnaker, C.B., Lamb, B.L, Henrikson, J., Bovee, K.D. y Bartholow, J., 1995. The Instream Flow Incremental Methodology. Biol. Rpt. 29, National Biological Service. Washington D.C.
28. Statzner, B. y Capra, H., 1997. Focusing environmental management budgets on non-linear system responses. En: Freshwater Biology, No. 37, pp. 463-472.
29. Tunbridge, B.R., 1988. Environmental flows and fish population of waters in the south-eastern region of Victoria. Department of Conservation, Victoria, Canada. Technical Report Series No. 65. 134 pp.
30. UPME (Unidad de Planeación Minero Energética), 2007a. Boletín Estadístico de Minas y Energía 2002-2007. Ministerio de Minas y Energía de Colombia. En: www.upme.gov.co.
31. UPME (Unidad de Planeación Minero Energética), 2007b. Plan Energético Nacional 2006-2025. Ministerio de Minas y Energía de Colombia, Bogotá. En: www.upme.gov.co.
32. Ward, J.V. y Stanford, J.A., 1979. The ecology of regulated streams. Plenum Press. New York.