

TECNOLOGÍA ECOLÓGICA PARA LA PLANIFICACIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS: REGÍMENES CAUDALES AMBIENTALES

ECOLOGICAL TECHNOLOGY FOR WATERSHED PLANNING: ENVIRONMENTAL FLOWS

JUAN MANUEL DIEZ HERNÁNDEZ¹ Y LILIANA BURBANO BURBANO²

PALABRAS CLAVE:

Caudal ecológico, régimen de caudales ambientales, IFIM, ecohidráulica

KEYWORDS:

Environmental Flow, Instream Flow Regime, IFIM, Ecohydraulics.

RESUMEN

La regulación de las corrientes fluviales es un proceso creciente desde que la sociedad comenzó a explotar los bienes y servicios que proporcionan estos sistemas. Una Gestión Hídrica ambiental persigue el aprovechamiento equilibrado de las funciones del medio fluvial, mediante un Régimen de Caudales Ambientales (RCA) adecuado que salvaguarde el patrimonio hidrobiológico y sociocultural, así como el disfrute de valores intrínsecos cada vez más apreciados (ecología, cultura, recreación o estética). Este trabajo revisa los efectos de la alteración del régimen natural de caudales en el ecosistema fluvial y analiza el modo de implantar unos caudales ecológicos confiables en Colombia. Se exponen ordenadamente los métodos principales para calcular RCA en el ámbito internacional y las pautas especificadas en la legislación nacional para esta finalidad. Finalmente, se concretan varios conceptos claves y las pautas convenientes para incorporar los caudales ambientales en los Planes de Ordenamiento de Cuencas y en las Evaluaciones Ambientales Estratégicas locales.

ABSTRACT

The regulation of the streams is an increasing process since the society began to use the services provided by these systems. An Environmental Water Planning pursues the balanced use of the river functions, by means of an adequate Instream Flow Regime, that preserves the hydrobiological and cultural patrimony, as well as the enjoyment of intrinsic values that are

Recibido para evaluación: Marzo 1 de 2007. Aprobado para publicación: Mayo 14 de 2007

1 Ph.D. Ingeniero Forestal. Profesor Grupo de Hidráulica e Hidrología. Universidad de Valladolid, España. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Av. Madrid 57 Palencia 34004, España. Pasante Post-doctoral: Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad del Cauca.

2 MSc. Bióloga. Doctoranda en Biotecnología. Universidad de Valladolid, España.

progressively more appreciated (ecology, culture, recreation or aesthetic). This paper reviews the effects of the natural flow regime alteration in the fluvial ecosystem, and it analyzes the best practice to implement reliable ecological flows in the local context. The main methods for Instream Flows setting and the guidelines specified in the national legislation are presented. Finally, some convenient rules are remarked to incorporate the environmental flows in the Watershed Management Plans and in the Strategic Environmental Assessment in Colombia.

INTRODUCCIÓN:

Caudales Fluviales Naturales

Los bienes y servicios que ofrecen las corrientes fluviales han fascinado históricamente a la sociedad por su capacidad para abastecer las crecientes demandas hídricas ligadas al abastecimiento humano, la generación hidroeléctrica, y las actividades agropecuarias, forestales e industriales. Sin embargo, este afán regulador permanente ha provocado una alteración progresiva del régimen natural de caudales en los ríos y los sistemas asociados, induciendo perturbaciones notables en la integridad del ecosistema fluvial.

Es bien sabido que la variación prístina de los caudales a escala temporal y espacial es un mecanismo esencial de la dinámica ecológica fluvial, que determina procesos fundamentales relativos a la conectividad del hábitat, la estructura de la comunidad y el flujo de nutrientes [1]. Los componentes que definen un régimen de caudales y regulan los procesos del ecosistema acuático son la: magnitud, frecuencia, duración, predictibilidad y la tasa de variación [2].

La magnitud y frecuencia de los caudales extremos regula numerosos procesos ecológicos. Las crecidas ordinarias transportan los sedimentos y nutrientes, rejuveneciendo la comunidad y asegurando la persistencia de especies con ciclos vitales rápidos y buena capacidad colonizadora [3]. Las crecidas extraordinarias mantienen la productividad y salvaguardan la diversidad del ecosistema mediante varios mecanismos: (a) removiendo los sedimentos del lecho, para evitar el sellado del medio intersticial [4]; (b) incorporando al cauce material leñoso procedente de la ribera [5]; (c) creando zonas de reposo y recuperación para la ictiofauna; (d) humedeciendo y rejuveneciendo el perfil edáfico en las márgenes [6]; y (e) preservando la resistencia y adaptación de los corredores riparios a las inundaciones [7].

Los caudales reducidos proporcionan un nuevo hábitat para ciertas plantas que permanecen inundadas mucho

tiempo [8], y propician la conclusión del ciclo vital de otras especies adaptadas a esas condiciones rudas. La duración de una condición de caudal condiciona algunos procesos ecológicos: por ejemplo, las tolerancias de algunos vegetales de ribera a las crecidas prolongadas [9] y de algunos peces a las sequías duraderas [10] les facultan para permanecer en ciertos lugares sin ser desplazados por especies menos tolerantes.

El significado ecológico de la predictibilidad de los caudales es primordial, ya que el ciclo vital de muchas especies se configura para aprovechar o eludir caudales de magnitudes diferentes. Por ejemplo, la secuencia natural de los caudales extremos (altos y bajos) obstaculiza la intromisión de ictiofauna exótica y proporciona señales ambientales a las especies autóctonas para iniciar el desove [11], la incubación [12], las migraciones [13] y los desplazamientos hacia las márgenes para alimentarse o reproducirse [14]. Los ciclos vitales de muchas especies de ribera están inducidos por la fenología y sincronizados con crecidas o sequías predecibles, lo que confiere a estos ecosistemas una diversidad alta [15].

Por último, la tasa de variación de caudal condiciona la persistencia y limita la coexistencia de ciertas especies. Las crecidas súbitas del régimen natural dificultan el establecimiento de las especies exóticas y proporcionan señales ambientales para la freza de algunos peces, que abandonan sus huevos en la columna de agua o adheridos a objetos sumergidos durante la recesión [16]. El descenso gradual de caudal permite que las plantas recién germinadas en las márgenes mantengan sus raíces en contacto con el agua edáfica [17].

GESTIÓN HÍDRICA Y CAUDALES AMBIENTALES

La problemática ambiental de la regulación fluvial es creciente y relativamente reciente en Colombia, si bien es muy conocida en el ámbito mundial desarrollado. De hecho, ya en el primer Congreso Internacional de Ríos Regulados (1979) se destacaba que: "los efectos de la

alteración de los caudales naturales a escala mundial han sido más severos e irreversibles que los debidos a la contaminación de las aguas" [18].

En el contexto actual de una planificación hídrica fragmentaria hacia el desarrollismo, las sociedades con una conciencia ambiental avanzada están demandando un manejo de los ríos cada vez más racional y ecológico, que compatibilice el aprovechamiento eficiente del recurso hídrico, con el mantenimiento de una integridad ecológica aceptable del ecosistema fluvial. La nueva cultura del agua que se propugna está basada en una Gestión Ecosistémica del Agua, cuyo enfoque integrador considera las dos facetas de un río como reserva hídrica y ambiental, de manera coherente con las necesidades de abastecimiento humano y suministro agrícola e industrial.

La gestión hídrica ambiental propugna un aprovechamiento equilibrado de los recursos fluviales, que salvaguarde el patrimonio hidrobiológico y sociocultural, las dinámicas geomorfológicas y los valores intrínsecos cada vez más apreciados (ecológico, cultural, recreativo, deportivo y estético). Pensamos que para impulsar este avance necesario en el país, resulta imprescindible que los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA), explicitados en la propuesta del Proyecto de Ley del Agua [19], incorporen como restricción inicial un Régimen de Caudales Ambientales (RCA) confiable. Un RCA imita la fenología prístina mediante una serie temporal de caudales de escala y duración variable, diseñada en función de la adaptabilidad de la biocenosis a las variaciones de caudal, que es capaz de mantener la funcionalidad plena de una corriente en términos ambientales, económicos y sociales. Bajo esta premisa, un caudal se considera ambiental (ecológico) si asegura el suministro requerido por la sociedad, a expensas de un detrimento tolerable de la calidad hidrobiológica en términos de estructura, composición y funcionamiento.

MARCO JURÍDICO RELATIVO A LOS "RCA"

La primera referencia oficial moderna que obliga a respetar unos caudales ecológicos aparece en EEUU (Washington Codes, 1949), concretando unos "caudales mínimos", para proteger el ecosistema fluvial, las actividades recreativas, la calidad del agua e incluso los valores estéticos. Este país pionero ha acumulado el esfuerzo investigador y la experiencia superiores en la deter-

minación de caudales ecológicos, finalidad para la que ha desarrollado varias metodologías específicas, que han sido estandarizadas para que su aplicación esté plenamente aceptada en ámbitos legales y científicos. En el actual contexto ambiental Europeo, la Directiva Marco de Aguas [20] establece el compromiso de los estados miembros en cuanto a la protección y regeneración sus aguas epicontinentales, con objeto de lograr un "buen estado ecológico" antes de 2015. El RCA constituye un indicador esencial del estado ecológico de un río según esta Directiva, puesto que además de condicionar los otros dos indicadores de calidad hidromorfológicos (continuidad y morfología), está vinculado con los indicadores de calidad biológicos y químicos-físicoquímicos.

La legislación Colombiana también incorpora con acierto esta necesidad en la propuesta de Ley de Agua [19], que define el Caudal Ecológico como: "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). De manera complementaria, la Ley ambiental 99/1993 (y modificaciones subsiguientes) exige una Licencia Ambiental para los proyectos hidráulicos: a nuestro juicio, los correspondientes estudios de impacto ambiental deben incluir un RCA bien concertado, que satisfaga los intereses de los colectivos implicados de modo razonable.

Adicionalmente, Colombia ha suscrito varios convenios internacionales, que incluyen de forma más o menos explícita el compromiso de respetar unos caudales ambientales que protejan el patrimonio fluvial. El Tercer Foro Mundial del Agua (2003) y el Plan de Aplicación de la Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible (2002) constituyen compromisos sólidos para una gestión hídrica verdaderamente ecosistémica. El Convenio para la Conservación de la Diversidad Biológica (1992), ratificado en 1994 (Ley 165), dedica varios artículos para señalar la necesidad de preservar el patrimonio ecológico. El Convenio RAMSAR (1971) reconoce la importancia de los humedales en la conservación global de la biodiversidad. Es destacable el programa "El Hombre y la Biosfera" (MaB), promovido por la UNESCO (1971) para estipular unas directrices para el manejo sostenible de la diversidad biológica. Además, Colombia se incorporó al Programa Áreas Importantes para la Conservación de las Aves AICAS (2000), con la intención de estimular la conservación de zonas relevantes

para la avifauna, cuya funcionalidad está vinculada a un régimen de caudales ajustado.

En la actualidad, los RCA son analizados tanto en el diseño de nuevas regulaciones de cursos y masas de agua, como en la recuperación de ríos degradados. En el primer caso, resultan básicos para la valoración ambiental correcta de un anteproyecto, proceso ligado a los principios de prevención, precaución y corrección en el origen que rigen la Evaluación Ambiental Estratégica (EAE).

APROXIMACIONES OPERATIVAS AL "RCA"

Las primeras aproximaciones científicas surgieron en EEUU durante la década de los 60, con el objeto de calcular unos caudales mínimos que preservasen algunas especies de ictiofauna comercial o deportiva. A partir de los años 70, la evolución progresiva del marco conceptual de un sistema fluvial fundamentó procedimientos analíticos con enfoques más amplios, que han incorporado un número creciente de componentes ambientales en la relación funcional entre el caudal y las condiciones de habitabilidad del río. Actualmente, se aplican más de 200 métodos para estimar caudales ecológicos en unos 50 países [21]. Los métodos principales se detallan en el compendio de King et al. [22] y en los trabajos en Español de Díez-Hernández [23] y Sanz-Ronda [24]. Seguidamente, se resumen los métodos principales de forma secuencial, ordenados según la tipología convencional.

Enfoques Hidrológicos

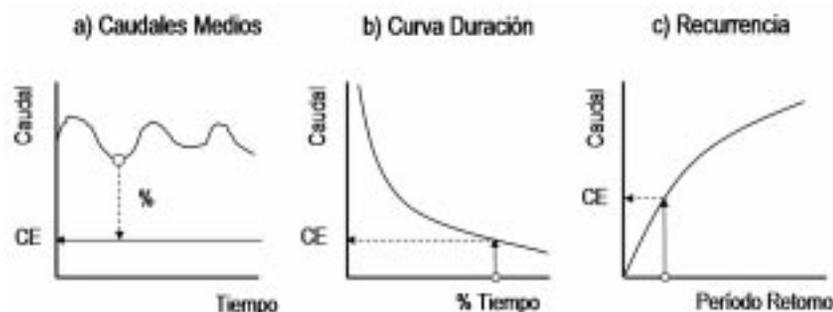
Estos procedimientos deducen el caudal ecológico a partir de diversos tratamientos estadísticos de la serie

de caudales naturales representativos (análisis de series temporales, caudales clasificados, medias móviles, etc). Esta descarga única se expresa generalmente como un porcentaje de un estadístico de tendencia central, como un percentil de la curva de duración, o bien asociado a un periodo de retorno.

Estos enfoques precisan de unos conocimientos técnicos y datos de entrada relativamente simples, lo que explica su aplicación profusa en contextos de escasa controversia y a distintas escalas operativas. Sin embargo, estos métodos poco flexibles adolecen de una resolución baja e incertidumbre significativa, lo cual limita la transferibilidad a condiciones disimilares a las que fundamentaron sus desarrollos.

Los procedimientos más sencillos calculan un caudal mínimo, como un porcentaje del caudal medio anual que varía del 10% al 60%, dependiendo del ambiente fluvial particular (Figura 1a). Son aproximaciones extremadamente simplistas, que incorporaban legislaciones de países como Francia (10%), España (10%), Alemania (30%-60%) e Irlanda (1%-10%), pero que posteriormente se revelaron válidas tan sólo para evaluaciones básicas de ríos con escaso valor ecológico. Un enfoque más comprensivo es el de Tharme [25], que conforma un RCA con caudales medios mensuales calculados como el 30% de los correspondientes flujos naturales.

La temporalidad de los registros foronómicos y su relación con los requerimientos de flujo del ecosistema son consideradas en los métodos que emplean las curvas de duración (Figura 1b). Tharme [25] compendia los métodos que calculan el caudal ecológico como un porcentaje variable (5%-20%) del percentil 90 de la curva de duración (Q90). El denominado "Nothorn Great



(a) Porcentaje de un caudal medio, (b) percentil de la curva de duración de caudales, y (c) periodo de retorno.

Plains Resource Program" [26] ha resultado satisfactorio en un rango amplio de condiciones fluviales de EEUU, y computa el caudal ecológico mensual como el Q90 de la curva de caudales medios diarios correspondiente, excepto en los meses más caudalosos que aplica el Q50. Existen también referencias del Q95 [27] y del Q96 [28].

En EEUU se han empleado enfoques basados en caudales asociados a ciertos periodos de retorno (Figura 1c). El más antiguo "7Q2" [29] calcula el caudal ecológico como el valor mínimo medio de 7 días consecutivos, para un período de retorno de dos años. Existen variaciones, como el "7Q10" [30].

Enfoques Hidráulicos

Los métodos agrupados como hidráulicos analizan la variación de alguna variable hidráulica simple (área hidráulica, perímetro mojado, etc.) con el caudal en secciones transversales representativas de áreas críticas, por su relevancia o sensibilidad biogénica. El más acreditado es del "Perímetro Mojado" [31], que analiza la relación entre esta variable hidráulica y el caudal, presuponiendo una lógica relación entre la disponibilidad de hábitat y el área mojada del biotopo. El cambio de pendiente marcado en la curva manifiesta el caudal mínimo que asegura la habitabilidad en los rápidos, y por extensión en el resto de ambientes del tramo.

Uno de los métodos más aplicados en el ámbito mundial es el de Tennant [32], desarrollado con mediciones en 11 ríos de tres estados de EEUU (MT, WY y NE) durante 10 años, y posteriormente validado para una diversidad amplia de tipologías fluviales. [44] Se fundamenta en la relación observada entre el caudal y la calidad del hábitat para la trucha, evaluada integrando las idoneidades individuales de la profundidad, velocidad y anchura. Los caudales recomendados se agrupan en dos períodos del año definidos, concretando unos porcentajes del caudal medio anual necesarios para conseguir unas calidades del hábitat graduales (Tabla 1).

Otro acercamiento inteligente es el de Hoppe [34], para evaluar las necesidades de hábitat para la trucha en el río "Frying Pan" (CO-EEUU).

Propone unos caudales mínimos para posibilitar las estrategias vitales del organismo, deducidos de la cur-

va de duración (Tabla 2). El autor recomienda utilizar los caudales medios diarios de una serie histórica mayor de veinte años. Como el método anterior, el inconveniente crucial reside en que su aplicación rigurosa impide la transferibilidad a ríos con dinámicas distintas a las de los estudiados en EEUU.

Un esquema predictivo decisivo en la evolución de la determinación de caudales ecológicos es el "Método de Washington" [35], que desarrolla una relación funcional entre el caudal y el hábitat idóneo para la freza y alimentación de los salmónidos. El sistema de representación del cauce consiste en varias secciones transversales (Figura 2a), en cada una de las cuales se miden las velocidades y las profundidades durante varios caudales (Figura 2b). Los campos simulados de ambas variables para cada caudal, se combinan con los requerimientos de hábitat conocidos, para obtener el respectivo campo de hábitat utilizable (Figura 2c). Del análisis

Tabla 1. Recomendaciones de Tennant (32) para conseguir calidades de hábitat variadas durante periodos semestrales en ríos trucheros de EEUU (MT, WY y NE).

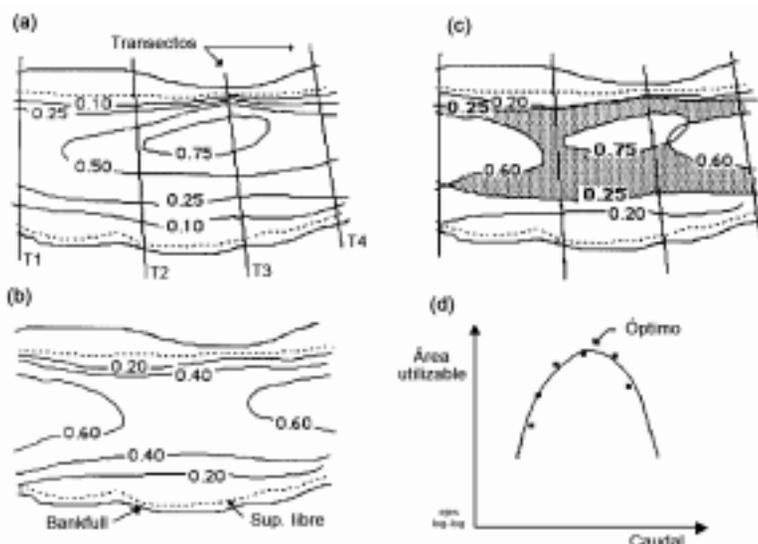
Estado Ecológico	Caudal Recomendado (% caudal medio anual)	
	Octubre. Marzo	Abril-Sept.
Intervalo Óptimo	60-100	60-100
Excepcional	60	40
Excelente	50	30
Adecuado	40	20
Ajustado	30	10
Degradado	10	10
Muy Degradado	<10	<10
Caudal de Lavado	200	200

Adaptada para el hemisferio sur de Orth y Maughan (33).

Tabla 2. Método de Hoppe (34) para calcular los caudales mínimos asociados a tres estrategias vitales de la trucha en el río "Frying Pan" (Colorado, EEUU).

Tipo de Caudal	Percentil Curva Duración
Lavado del Cauce	Q62
Desove	Q147
Producción y Refugio	Q294

Figura 2. Método de Washington (35) para calcular caudales mínimos



de la relación entre el caudal y la superficie del hábitat, se deduce el intervalo de caudales aceptables (Figura 2d): entre el óptimo (máximo) y el mínimo (70% del máximo).

Enfoques Multivariados

Basándose en el concepto de preferencia biológica de un organismo respecto a las variables que determinan su hábitat [36, 37], los investigadores Binns y Eiserman [38] transforman las idoneidades de 22 variables (físicas, químicas, hidráulicas, estructurales y biológicas) en coeficientes y analizan las regresiones entre cada variable y la biomasa de peces para un caudal. Las variables con una correlación más fuerte son seleccionadas para un ajuste lineal multivariable con la misma biomasa. El producto del método consiste en un conjunto de regresiones entre un número diferente de variables y la biomasa para un caudal, a la que denominan "Habitat Quality Index (HQI)". El cálculo del HQI para caudales adicionales de Binns [39] proporciona la curva Caudal-HQI interpretable.

Numerosos investigadores han desarrollado ecuaciones similares: Barber et al. [40] relacionan 10 variables (hidráulicas y estructurales) con la biomasa del salmón plateado (*Oncorhynchus kisutch*); Nickelson et al. [41] establecen una regresión múltiple entre 3 variables (profundidad, velocidad y sustrato) y la biomasa de dos truchas (*Oncorhynchus clarkii* y *Oncorhynchus mykiss*); Oswood y Barber [42] encuentran buenas regresiones entre la superficie de varios mesohabitats y la

biomasa del salmón plateado y dos truchas (*Salmo clarkii* y *Salmo gairdneri*); Nickelson [43] propone una regresión entre el volumen de agua en las pozas y la biomasa del salmón plateado juvenil; Layzer [44] encuentra regresiones entre grupos de 15 variables (químicas y estructurales) que explican hasta el 99% de la variabilidad de la biomasa; Taylor [45] relaciona el caudal y ciertas variables de la cuenca con la anchura de la franja riparia; y White et al. [46] desarrollan algunas regresiones que vinculan ciertas variables foronómicas con la biomasa de la trucha.

Richter et al. [47] presentan el método sugestivo "Range of Variability Approach" (RVA), que utiliza 32 parámetros hidrológicos para caracterizar el régimen natural de caudales y los indicadores IHA ("Indicators of Hydrologic Alteration") propuestos posteriormente por Richter et al. [48]. Aunque la técnica resulta muy laboriosa, sus promotores destacan que incorpora la interrelación entre los conceptos de variabilidad hidrológica e integridad del ecosistema fluvial.

Métodos Ecohidráulicos

Los avanzados modelos ecohidráulicos perfeccionan las aproximaciones anteriores e integran la mejor práctica para determinar RCA en la actualidad. En esencia, evalúan la cantidad e idoneidad del hábitat acuático utilizable para una especie o biocenosis (comúnmente ictiofauna o macroinvertebrados), que generan diferentes series de caudales bajo múltiples escenarios de estructura biológica configurables.

Sin duda, la metodología más acreditada, completa y utilizada actualmente en el ámbito mundial es la "Instream Flow Incremental Methodology" (IFIM), promovida por el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EEUU [49] como un sistema estándar de apoyo a la decisión en la planificación hídrica ambiental. IFIM es un marco conceptual y analítico comprensivo, que combina con lógica enfoques ecohidrológicos y ecohidráulicos avanzados, con la finalidad de evaluar a escala temporal y espacial los efectos provocados por variaciones de caudal en la disponibilidad de hábitat físico, la estructura del cauce y la calidad físico-química del agua.

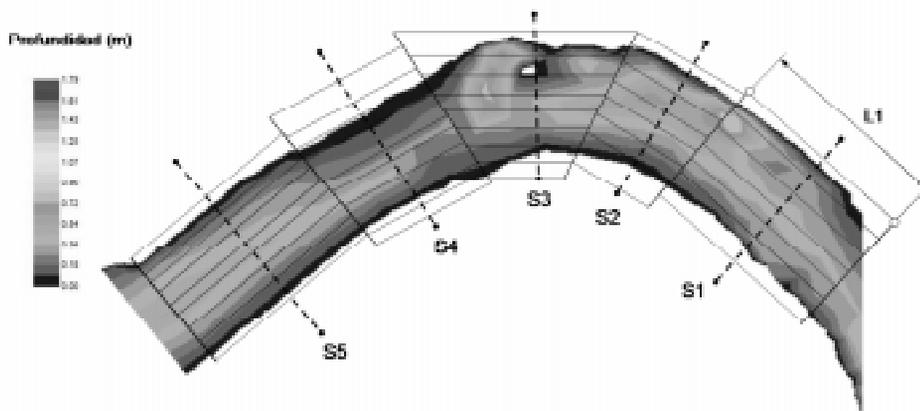
IFIM incorpora el modelo de simulación del hábitat fluvial PHABSIM ("Physical Habitat Simulation System") para cuantificar con alta resolución la cantidad de microhábitat disponible para los organismos objetivo durante diferentes caudales, a partir de una combinación de datos hidráulicos, biológicos e hidrológicos. El esquema operativo jerárquico de IFIM se estructura en cinco fases estrictamente necesarias para una resolución exitosa, que se detallan en los manuales oficiales [50, 51].

El protocolo de caracterización fluvial de IFIM comienza con la inventariación de las distintas unidades morfodinámicas identificables en el tramo estudiado (p.ej. rápidos, tablas y remansos). En el esquema tradicional unidimensional (1D), cada hábitat se representa mediante alguna sección transversal, en la que se efectúan mediciones del sustrato, velocidad y profundidad para múltiples caudales (Figura 3).

Las modelaciones espacial y temporal del hábitat acuático han sido informatizadas convenientemente en el programa RHABSIM© en español [52], cuya aplicación modélica en el río Palacé (Cauca) se muestra en la Figura 4. A partir de la información de campo, se simulan en cada sección transversal las distribuciones de profundidades y velocidades para caudales incrementales dentro de un rango delimitado (Figura 4 arr-izqda). Para ello, IFIM incorpora esquemas numéricos de solución convencionales para flujos unidimensionales (1D) permanentes, uniformes (ecuación de Manning) o gradualmente variados (método del paso estándar).

Los procesos biológicos se incorporan en PHABSIM mediante las "curvas de preferencia", funciones univariadas que cuantifican las idoneidades del hábitat para un organismo ligadas a las variables determinantes (profundidad, velocidad, material del lecho, etc.), mediante un coeficiente entre cero y uno (Fig.4 arr-dcha). Existe una colección extensa de curvas de organismos (peces, macroinvertebrados, anfibios, reptiles, etc.) y funciones fluviales (pesca, deportes náuticos, paisajismo, etc.), que pueden ser referenciales en estudios de presupuesto limitado donde el desarrollo de modelos locales resulte inviable. La modelación del hábitat fluvial combina adecuadamente el microentorno hidráulico simulado a escala espacial y temporal con las curvas de preferencia fijadas, para desarrollar las decisivas relaciones funcionales entre el Caudal y un Índice de Hábitat que evalúa la aptitud del mismo para cada organismo objetivo (Fig.4 cenizqda). De la interpretación conjunta de estas curvas y de las series temporales

Figura 3. Esquema de la caracterización fluvial empleado en IFIM.



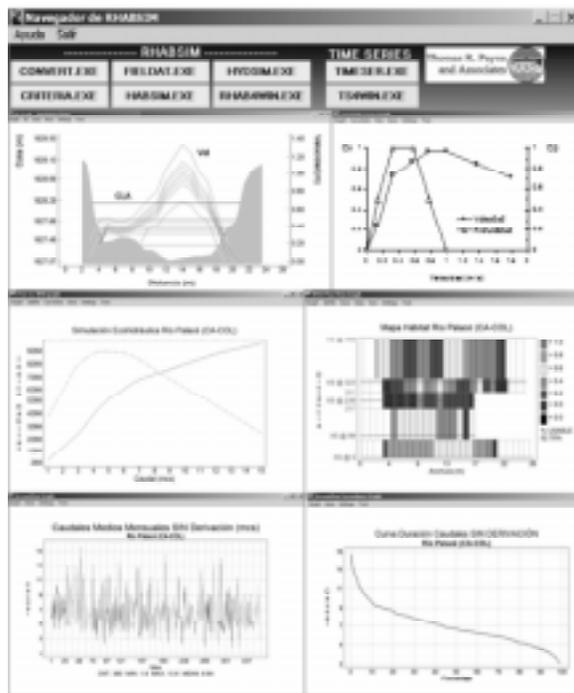
El tramo fluvial se representa mediante secciones transversales, divididas en múltiples celdas computacionales. El dominio acuático queda discretizado por una malla de elementos prismáticos (trapezoides en planta). Por ejemplo, la sección S1 representa un tramo rectilíneo de longitud L1, discretizado en celdas rectangulares.

de caudales (Fig.4 abajo) se deriva un régimen de caudales ambientales defendible, conformado por las descargas que proporcionan un Índice de Hábitat aceptable y posibilitan funciones productivas del río.

El resultado espacial de un análisis IFIM clásico 1D divide el cauce en celdas rectangulares contiguas de dimensiones variables, en función del espaciamiento longitudinal entre secciones y transversal entre estacionamientos topográficos (Figura 4 cen-dcha). Mediante este enfoque 1D se pueden determinar regímenes de caudales confiables en estudios ordinarios.

En el ámbito Iberoamericano, las primeras aplicaciones de IFIM se realizan a finales de los ochenta en España y Portugal, países en los que esta metodología ha sido contrastada y su utilización es progresiva. En Colombia, conocemos la aplicación pionera el río Palacé

Figura 4. Gráficos del análisis IFIM de Caudales Ambientales en el río Palacé (Cauca), informatizado con el programa RHABSIM® en español (52)



(arr-izqda) simulación hidráulica de una sección; (arr-dcha) curvas de preferencia de los macroinvertebrados; (cen-izqda) relaciones Caudal-Índice Hábitat para los dos organismos objetivo: ictiofauna adulta y macroinvertebrados; (cen-dcha) mapa de idoneidad de hábitat en las celdas, codificadas en colores; (ab-dcha) serie de caudales del río Palacé antes de la derivación proyectada abastecedora de Popayán (500 l/s); (ab-izqda) curva de duración de caudales sin derivación

(Cauca) de Campo y Hernández (53), que evalúa la derivación de 500 l/s proyectada para el nuevo acueducto de Popayán.

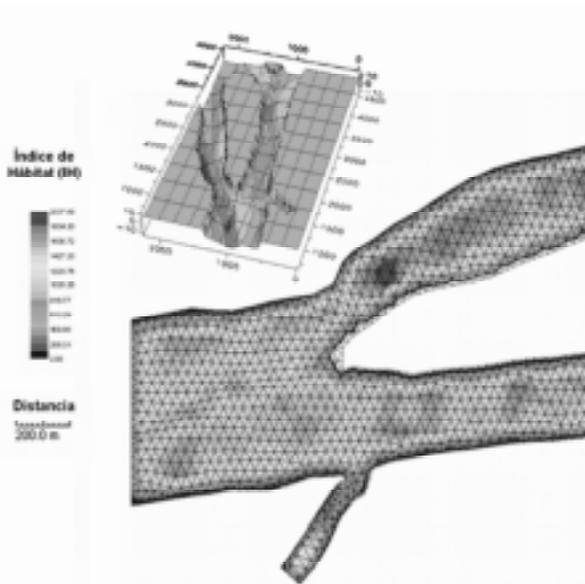
Los modelos hidrodinámicos multidimensionales (2D-3D) recientemente informatizados son aplicables en IFIM, mejorando notablemente la resolución espacial y la flexibilidad analítica. La caracterización fluvial discretiza el dominio modelable en una malla geométrica flexible de elementos finitos, en cada uno de los cuales se calcula la profundidad y la velocidad media, resolviendo un sistema de ecuaciones algebraicas mediante un esquema numérico hidrodinámico. Las técnicas 2D son convenientes para topografías complicadas y flujos complejos con fenómenos poco predecibles, si bien su mayor exigencia de información de campo y conocimientos técnicos limita su ámbito de aplicación. En Colombia, la investigación de Diez-Hernández [54] modela con éxito la ecohidráulica 2D de un tramo bajo del río Magdalena (Calamar-Bolívar) (Figura 5), dentro del análisis comparativo de las capacidades predictivas de los modelos 1D y 2D en dominios grandes. [55]

REFLEXIONES SOBRE LOS RCA EN COLOMBIA

El desarrollo del marco conceptual y operativo acertado para establecer RCA en Colombia, debe adaptarse a las particularidades ecohidrológicas y socioeconómicas de sus sistemas fluviales.

Los lineamientos oficiales para calcular Caudales Ambientales se incorporan actualmente en el Proyecto de Ley del Agua (19, Art. 21). Hasta que los organismos encargados formulen recomendaciones específicas, la norma explicita un método hidrológico para calcular un Caudal Ecológico Mínimo: "...el valor de permanencia en la fuente durante el 90% del tiempo". Anteriormente, la Resolución 0865 explicativa del Índice de Escasez [56] presenta dos enfoques hidrológicos alternativos para obtener el caudal ecológico: 1) el primero se fundamenta en el Estudio Nacional del Agua [57] y computa el caudal medio diario promedio de 5-10 años cuya duración es igual o mayor del 97.5%, el cual se comprueba está asociado a una recurrencia de 2.3 años. 2) El segundo enfoque relaciona el caudal ecológico con un porcentaje en torno al 25% del caudal medio mensual multianual menor de la corriente.

Figura 5. Fracción de la simulación ecohidráulica 2D del río Magdalena (sector de Calamar) para el caudal medio de 7200 m³/s y curvas de preferencia para ambientes profundos y moderadamente rápidos. Incluye el inicio del Canal del Dique y la isla Becerra.



Seguidamente, exponemos unas consideraciones que juzgamos oportunas para incorporar convenientemente los RCA en los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas (POMCA) y en las Evaluaciones Ambientales Estratégicas (EAE) de este país con una diversidad hidrobiológica sobresaliente.

En cuanto a la terminología indicada para referirse a los requerimientos de flujo para el ecosistema fluvial, la bibliografía recopila vocablos diversos, pero que comparten una misma acepción en la práctica: caudal ambiental, ecológico, mínimo, aconsejable, mantenimiento, etc. Para una mayor practicidad, aconsejamos la denominación Caudales Ambientales (RCA), habida cuenta de su amplia comprensibilidad en ámbitos diversos y su rigor conceptual defendible.

Una Gestión Hídrica Ambiental verdadera debe respetar un RCA confiable, conformado por unos caudales variados que imitan el patrón del hidrograma natural. Un RCA completo integra los requerimientos hídricos de los distintos componentes bióticos del sistema fluvial. Para ello debe especificar los manejos de caudales precisos para preservar las siguientes facetas: dinámica geomorfológica (caudal generador), integridad de la ribera (caudal de inundación), calidad del agua (caudal de dilución), funcionalidad del

ecosistema, dinámica fluvial litoral, así como los valores socio-económicos, culturales, recreativos y otros.

Los RCA exitosos provienen de negociaciones equilibradas, en las que todos los colectivos implicados en la gestión hídrica de una cuenca encuentran satisfechos sus intereses de modo razonable. El procedimiento conveniente para Colombia debe incorporar un componente destacado de participación social, tanto en la elección de métodos como en la información pública de los escenarios analíticos. En este sentido, sería bueno para los ríos de Colombia que los RCA se integrasen en las EAE.

Respecto a la financiación de los caudales ambientales, la restricción de volumen para una utilidad productiva supone un costo que debe incluirse en la planificación ambiental. Por ello, las Administraciones Públicas deben jugar un papel vital en el intrincado reparto del agua, implementando unas políticas tarifarias que promuevan la utilización responsable y solidaria de este recurso limitado.

La elevada complejidad de los ecosistemas epicontinentales de Colombia, hace precisa una selección prudente de los métodos indicados para calcular RCA. La experiencia internacional acumulada aconseja rehuir los planteamientos simplistas del sistema fluvial, asociados a soluciones rápidas y poco negociables. Con esta premisa, un marco normativo desarrollado en cuanto al Ordenamiento Ambiental de Cuencas Hidrográficas debe recomendar técnicas más comprensivas para determinar RCA, que tengan un respaldo científico superior y suficiente validación en condiciones análogas.

Actualmente, la metodología más utilizada en el ámbito mundial es la ecohidráulica IFIM, cuya efectividad para lograr soluciones de gestión hídrica negociadas está demostrada. Pensamos que IFIM es una herramienta válida para determinar caudales ecológicos en ríos de Colombia, y completamente integrable en los POMCA. Con un esfuerzo investigador razonable se pueden diseñar protocolos IFIM adaptados a las condiciones ambientales locales, que generen unos RCA optimizados en su balance fiabilidad-costo. La implementación de RCA rigurosos resulta indispensable para mantener un estado ecológico aceptable en los ecosistemas acuáticos y en las cuencas hidrográficas de Colombia.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es posible gracias al apoyo financiero de la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI), mediante una beca de investigación Postdoctoral MAEAECI.

REFERENCIAS

- [1] POFF, N.L. Natural flow regime as a paradigm for river restoration, a hydroecological context for ecohydraulics?. Proc. V International Symposium on Ecohydraulics. Madrid, 2004.
- [2] WALKER, K.F., SHELDON, F., y PUCKRIDGE, J.T. A perspective on dryland ecosystem. *Regulated Rivers*, 11, 85-104, 1995.
- [3] FISHER, S.G. Succession in streams, 7-27, en: *Stream Ecology: application and testing of general ecology theory*. Barnes, J.R. y Minshall, G.W. (Eds). Plenum Press, New York, 1983.
- [4] BESCHTA, R.L. y JACKSON, W.L. The intrusion of fine sediments into a stable gravel bed. *Journal of Fisheries Research Board of Canada*, 36, 207-210, 1979.
- [5] MOORE, K.M. y GREGORY, S.V. Response of young-of-the-year cutthroat trout to manipulations of habitat structure in a small stream. *Transactions of the American Fisheries Society*, 117, 162-170, 1988.
- [6] SCOTT, M.L., FRIEDMAN, J.M., y AUBLE, G.T. Fluvial processes and the establishment of bottomland trees. *Geomorphology*, 14, 327-339, 1996.
- [7] HUPP, C.R. y OSTERKAMP, W.R. Bottomland vegetation distribution along Passage Creek, Virginia, in relation to fluvial landforms. *Ecology*, 66, 670-681, 1985.
- [8] WHARTON, C.H. y LAMBOU, V.W. The fauna of bottomland hardwoods in the southeastern United States, 87-160, en: *Wetlands of bottomland hardwood forests*. Clark, J.R. y Benforado, J. (Eds.). Elsevier Scientific. New York, 1981.
- [9] CHAPMAN, R.J., HINCLEY, T.M., LEE, L.C., y TESKEY, R.O. Impact of water level changes on woody riparian wetland communities. USFWS-OBS-82/83. Kearnesysville, EEUU, 1982.
- [10] WILLIAMS, D.D. y HYNES, H.B.N. The ecology of temporary streams II: General remarks on temporary streams. *Internationale Revue des gesampften Hydrobiologie* 62, 53-61, 1977.
- [11] MONTGOMERY, W.L. y MCCORMICK, S.D. Spring migratory synchrony of salmonid, catostomid, and cyprinid fishes in Rivière á la Truite, Québec. *Canadian Journal of Zoology*, 61, 2495-2502, 1983.
- [12] NÆSJE, T., JONSSON, B., y SKURDAL, J. Spring flood: a primary cue for hatching of river spawning Coregoninae. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 52, 2190-2196, 1995.
- [13] TRÉPANIÉ, S., RODRÍGUEZ, M.A. y MAGNAN, P. Spawning migrations in landlocked Atlantic Salmon: time series modelling of river discharge. *Journal of Fish Biology*, 48, 925-936, 1996.
- [14] JUNK, W.J., BAYLEY, P.B. y SPARKS, R.E. 1989. The flood pulse concept in river-floodplain systems. *Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences* 106, 110-127, 1989.
- [15] STRENG D.R., GLITZENSTEIN, J.S., y HARCOMBE, P.A. Woody seedling dynamics in an East Texas floodplain forest. *Ecological Monographs* 59, 177-204, 1989.
- [16] FAUSCH, K.D. y BESTGEN, K.R. Ecology of fishes indigenous to the central and southwestern Great Plains. 131-166, en: *Ecology and Conservation of Great Plains vertebrates*. Knopf, F.L. y Samson, F.B. (Eds). Springer-Verlag. New York, 1997.
- [17] ROOD S.B. y MAHONEY, J.M. Instream flows and the decline of the riparian cottonwoods along the St. Mary River, Alberta. *Canadian Journal of Botany*, 73, 1250-1260, 1995.
- [18] STANDFORD, J.A. y WARD, J.V. Stream regulation in North America. 215-236, en: *The ecology of regulated streams*. Ward, J.V. y Standford, J.A. (Eds). Plenum Press. New York, 1979.
- [19] MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL DE COLOMBIA. Proyecto de Ley del Agua (borrador). <http://www.miniambiente.gov.co>, 2005.
- [20] OJEC (Official Journal of the European Communities). 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, 2000.
- [21] STATZNER, B. y CAPRA, H. Focusing Environmental Management Budgets on Non-linear System Responses. *Freshwater Biology*, 37, 463-472, 1997.
- [22] KING, J.M., THARME, R.E., Y BROWN, C.A. World Commission on Dams Thematic Report: Definition and implementation of instream flows. University of Cape Town, South Africa, 1999.

- [23] DIEZ HERNÁNDEZ, J.M. Análisis Comparativo de los métodos de simulación hidráulica en PHABSIM, con propuesta de nuevos métodos hidráulicos en una dimensión. ProQuest-Information and Learning, Madrid, España, 2005. ISBN 0-496-97826-8, 428 p.
- [24] SANZ RONDA, F.J. Evaluación de diferentes técnicas de muestreo utilizadas en la cuantificación del hábitat fluvial. Tesis Doctoral, ETS Ingenierías Agrarias, Uni-versidad de Valladolid, España, 2004.
- [25] THARME, R.E. Review of the International Methodologies for the Quantification of the Instream Flow Requirements of Rivers. Water Law Review Final Report for Policy Development for the Department of Water Affairs and Forestry, University of Cape Town, South Africa, 1996.
- [26] NGPRP (Northern Great Plains Resource Program). instream Needs Subgroup Report: Work Group C, Northern Great Plains Resource Program. USFWS, Washington DC, 1974.
- [27] DACOVA, SN., UZUNOV, Y., y MANDADJIEV, D. Low Flow - the river's ecosystem limiting factor. Ecological Engineering, 2000.
- [28] BRAGG, O.M., BLACK, A.R., y DUCK, R.W. Anthropogenic impacts on the hydrology of rivers and lochs. Literature review and proposed methods. Scotland & Forum for Environmental Research, 1999.
- [29] STALNAKER, C.B. y ARNETTE, J.L (Eds). Methodologies for the Determination of Stream Resource Maintenance Flow Requirements. Utah State University. Logan, Utah, 1976.
- [30] CAISSIE, D. y EL-JABI, N. Comparison and regionalization of hydrologically based instream flow techniques in Atlantic Canada. Canadian Journal of Civil Engineer, 22, 235-246, 1994.
- [31] 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.
- [32] TENNANT, D.L. Instream flow requirements for fish, wildlife, recreation, and related environmental resources. 359-373, en: Proc. Symposium and Specialty Conference on Instream Flow Needs. Osborn, J.B. y Allman, C.H (Eds). Am. Fish. Soc. Bethesda, Maryland, 1976.
- [33] ORTH, D.J. y MAUGHAN, O.E. Evaluation of the Incremental methodology for recommending instream flows for fishes. Trans. of the American Fisheries Society, 111, 413-445, 1982.
- [34] HOPPE, R.A. Minimum streamflows for fish. Proc. of the Soils Hydrology Workshop. U.S. Forest Service, Montana State University. Bozeman, Montana., 1975.
- [35] COLLINGS, M.R. A Methodology For Determining Instream Flow Requirement for Fish, Proceedings of Instream Flow Methodology Workshop, 72-86. Washington Dept. of Ecology, Olympia, EEUU, 1972.
- [36] GORDON, N.D., McMAHON, T.A. y FINLANYSON, B.L. Stream hydrology: An introduction for Ecologist. Chicester, Reino Unido. Wiley & Sons. Reino Unido, 1992.
- [37] WATERS, B.F. A methodology for evaluating the effects of different streamflows on salmonid habitat. 334-343 (Vol. II), en: Proc. Symposium and Specialty Conference on Instream Flow Needs. OSBORN, J.B. y ALLMAN, C.H. (Eds). Am. Fish. Soc. Bethesda, Maryland, 1976.
- [38] BINNS, N.A. y EISERMAN, F.M. Quantification of fluvial trout habitat in Wyoming. Trans. American Fisheries Society, 108, 215-228, 1979.
- [39] BINNS, N.A. Habitat quality index procedures manual. Wyoming Game and Fish Department. Cheyenne, Wyoming, 1982.
- [40] BARBER, W.E., OSWOOD, M.W. y DESCHERMEIER, S.J. A fish stream habitat survey technique for predicting fish abundance. En: Proc. Symposium Acquisition of Aquatic Habitat Information. N.B. ARMANTROUT (Ed). Am. Fish. Soc. Bethesda. Maryland, 1980.
- [41] NICKELSON, R.E. y REISENBICHLER, R.R. Streamflow requirements of salmonids. Progress report of the Oregon Dept. Fish Wildl. AFS-62 No. 14-16-0001-4247. Portland, Oregon, 1977.
- [42] OSWOOD, M.E. y BARBER, W.E. Assessment of fish habitat in streams: goals, constraints, and a new technique. Fisheries, 7(3), 8-11, 1982.
- [43] NICKELSON, T.E. Development of methodologies for evaluating instream flow needs for salmonid rearing. 334-343, en: Proceedings of the Symposium and Specialty Conference on Instream Flow Needs. OSBORN, J.B. Y ALLMAN, C.H. (Eds). American Fisheries Society. Bethesda, Maryland, 1976.
- [44] LAYZER, J.B. Integrating hydraulic stream ecology with the instream flow incremental methodology for determining conservation flows for freshwater mussels. 170-183, en: Proc. 1st International

- Symposium on Habitat Hydraulics. Thronheim, Noruega, 1994.
- [45] TAYLOR, D.W. Eastern Sierra riparian vegetation: ecological effects of stream diversion. Mono Basin Research Group Contribution No. 6, Report to Inyo National Forest, 1982..
- [46] WHITE, R.J., HANSEN, E.A. y ALEXANDER, G.R. Relationship of trout abundance to stream flow in Midwestern streams. 334-343 (Vol. II), en: Proc. Symposium and Specialty Conference on Instream Flow Needs. OSBORN, J.F. y ALLMAN, C.H. (Eds). Am. Fish. Soc. Bethesda, Maryland, 1976.
- [47] RICHTER, B.D., BAUMGARTNER, J.V. y POWELL, J. A Method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 10, 1163-1174, 1996.
- [48] RITCHER, B.D., BAUMGARTNER, J.V. y WIGINGTON, R. How much water does a river need?. *Freshwater Biology*, 37, 231-249, 1997.
- [49] 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.
- [50] BOVEE, K.D. Development and Evaluation of Habitat Suitability Criteria for Use in IFIM. Instream Flow Paper No. 21, Fort Collins (CO-EEUU), 1986.
- [51] WADDLE, T. (ed.). PHABSIM for Windows: User's Manual and Exercises. U.S. Geological Survey. Fort Collins, Colorado, 2001.
- [52] PAYNE, T.R. y DIEZ HERNÁNDEZ, J.M. Actualización del Modelo RHABSIM 3.0 para estimación de caudales ecológicos. *Revista EIDENAR*, Vol. 111, 1(3), 12-17, 2005.
- [53] CAMPO ERAZO, Y.F. y RUIZ COBO, D.H. Estimación del Régimen de Caudales Ecológicos en el río Palacé (Cauca). Tesis de Grado Biología, Universidad del Cauca. Popayán, Colombia, 2001.
- [54] DIEZ HERNÁNDEZ, J.M. Modelación fluvial multidimensional aplicada al cálculo de Caudales Ecológicos. Actas XVII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología (CD). 15-16/09/2006, Popayán, 2006.
- [55] GHANEM, A., STEFFLER, P. y HICKS, F. Two Dimensional Finite Element Modeling of Flow in Aquatic Habitats. Water Resources Engineering Report. Department of Civil Engineering. University of Alberta. Edmonton, Canadá, 1995.
- [56] 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.
- [57] IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). Estudio Nacional del Agua. Bogotá, 2004. <http://www.ideam.gov.co/publica/index4.htm>.