

# *Determinación de caudales ambientales confiables en Colombia: el ejemplo del río Palacé (Cauca)*

Recibido para evaluación: 07 de Febrero de 2007  
Aceptación: 17 de Abril de 2007  
Recibido versión final: 20 de Abril de 2007

Juan Manuel Diez Hernández<sup>1</sup>  
Darío Hernán Ruiz Cobo<sup>2</sup>

## RESUMEN

La explotación creciente de los recursos hídricos en Colombia requiere una reglamentación avanzada para determinar los Regímenes de Caudales Ambientales (RCA) que fundamentan los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA). Entre la diversidad de enfoques propuestos para evaluar RCA, el más utilizado y aceptado científicamente es la conocida metodología «Instream Flow Incremental Methodology» (IFIM), cuya aplicabilidad en los ríos de Colombia se ensaya por primera vez en este trabajo. La modelación IFIM del río Palacé aguas abajo de la nueva captación de 500 l/s para el acueducto de Popayán (Cauca) revela que el efecto de la detración limitada del 6.78% del caudal medio anual sobre la integridad ecosistémica fluvial es muy leve. Las simulaciones eco- hidráulica y eco- hidrológica del tramo fluvial representativo (longitud 500m, anchura 18m, pendiente 5% y granulometría gruesa) con el programa RHABSIM 3.0, detectaron disminuciones poco significativas del hábitat disponible para la ictiofauna y los macroinvertebrados acuáticos. En consecuencia, el manejo de caudales actual del Palacé vinculado a la captación del nuevo acueducto de Popayán es corroborado, según este análisis avanzado IFIM, como un RCA satisfactorio. Este trabajo sugiere investigaciones dirigidas al perfeccionamiento y particularización de IFIM para las condiciones fluviales de Colombia.

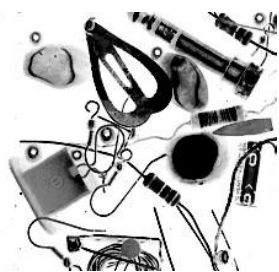
**PALABRAS CLAVE:** Caudales Ambientales, IFIM, PHABSIM, Palacé.

## ABSTRACT

The increasing exploitation of the water resources in Colombia requires an advanced Environmental Flows Regime (EFR) regulation, for a properly design of the Watershed Planning and Management Programs. Among the diversity of approaches proposed to EFR assessment, the most used and scientifically accepted is the well-known «Instream Flow Incremental Methodology» (IFIM), whose applicability for Colombian rivers is explored in this study. The IFIM modeling of the Palacé River below the diversion of 500 l/s to the new water-supply facilities in Popayán (Cauca), reveals that the global effect of this limited derivation of the 6.78% mean annual flow in the integrity of the aquatic ecosystem is very low. The ecohydraulic and ecohydrological simulations of the representative reach (500m length, 18m width, 5‰ slope and coarse substrate) analyzed with the software RHABSIM 3.0, revealed some not very significant reductions of the usable habitat for adult fishes and macroinvertebrates. Consequently, the present instream flows regime of the Palacé River caused by the diversion project is corroborated as a satisfactory EFR, according to the IFIM evaluation system. Finally, some research lines are suggested, that are focused to the improvement and adaptation of the IFIM to the particular fluvial conditions of Colombia.

**KEY WORDS:** Environmental Flows, Instream Flows, IFIM, PHABSIM, Palacé.

**1. Ph.D. Ingeniero Forestal; Profesor del Grupo de Hidráulica e Hidrología, Universidad de Valladolid, España**  
Juan Manuel Diez Hernández  
jmdiez@iaf.uva.es  
**2. MSc. Biólogo; Investigador Asociado; Grupo de Estudios Ambientales, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia**



## 1. INTRODUCCIÓN: LA SIGNIFICACIÓN DE LOS CAUDALES AMBIENTALES

El aprovechamiento progresivo del recurso hídrico superficial a escala temporal y espacial ha venido determinado históricamente por el incremento de las demandas ligadas al abastecimiento humano y a las actividades industriales, agropecuarias e hidroeléctricas. Colombia no es ajena a este proceso intervencionista del dominio hidráulico, el cual favorece un desarrollo valioso indiscutible, pero a expensas de un deterioro preocupante de los ecosistemas fluviales. Aunque el derecho legal para extraer agua de una corriente para finalidades diversas ha sido reconocido durante siglos, la noción de unos caudales ambientales preservadores de las dinámicas fluviales es relativamente muy reciente (Lamb y Doerksem, 1987).

La gestión hídrica ambiental que propugna la Ley del Agua de Colombia (MAVDT<sup>3</sup>, 2005) se fundamenta en los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) que son diseñados con principios convenientes para distribuir el recurso con unas prioridades estipuladas, que salvaguardan el buen estado ecológico de los sistemas acuáticos. Un componente esencial de esta planificación ecosistémica es la restricción impuesta por la demanda medioambiental ligada al Caudal Ecológico, definido como «aquel que deberá mantener una corriente en un tramo determinado, a fin de garantizar la conservación de los recursos hidrobiológicos y los ecosistemas asociados» (Art.21). Las aproximaciones operacionales al Caudal Ecológico presentadas por los organismos ambientales nacionales se basan en concepciones simplificadas del ecosistema acuático y calculan mediante métodos estadísticos sencillos un valor de caudal único (MAVDT, 2004). Además de resultar esencial para mantener el funcionamiento aceptable de las dinámicas fluviales bióticas y abióticas, el caudal ecológico restringe la oferta hídrica de una cuenca, al influir en el Factor de Protección de Fuentes Frágiles propuesto para calcular el Índice de Escasez modificado (IDEAM, 2004). En consecuencia, la trascendencia del Caudal Ecológico se realza en la Ley del Agua, ya que determina de modo más o menos explícito las Tasas por Uso y Retributivas necesarias para la operatividad de los POMCA (Art. 81).

A nuestro juicio, el manejo integral de los ríos que se está promoviendo en Colombia, debe cimentarse en unos Regímenes de Caudales Ambientales (RCA) comprensivos, que consideren las dos facetas de un río: como reservas hídrica y ambiental. Un RCA confiable posibilita un aprovechamiento equilibrado de los bienes y servicios que ofrece el medio fluvial, pero conservando el patrimonio hidrobiológico y sociocultural, las dinámicas geomorfológicas y los valores intrínsecos cada vez más apreciados (ecológico, cultural, recreativo, deportivo y estético, etc).

Un RCA emula la fenología primigenia mediante una serie temporal de caudales de escala y duración variable, diseñada en función de la adaptabilidad de la biocenosis a los cambios de caudal. Este trabajo presenta la metodología más acreditada y aplicada en el ámbito mundial para evaluar los requerimientos hídricos del ecosistema fluvial en un estudio de caudales ambientales, denominada «Instream Flow Incremental Methodology» – IFIM (Bovee y Milhous, 1978). Conscientes de la capacidad notable de IFIM para modelar la ecodinámica en ríos de Colombia, detallamos su aplicación pionera el río Palacé (Cauca). Se ha seguido un protocolo de caracterización fluvial que consideramos adecuado para los estudios normales de caudales ambientales locales, cuyo balance entre la precisión y el coste está optimizado.

## 2. PROCEDIMIENTOS PARA EVALUAR CAUDALES AMBIENTALES

Desde la aparición de la primera obligatoriedad jurídica moderna de respetar unos caudales ecológicos mínimos a mediados del siglo pasado en EEUU (Washington Codes § 75.20.050, 1949), se han aplicado numerosos métodos de cálculo, con rigores conceptuales y grados de acierto progresivos. De hecho, actualmente se contabilizan más de 200 técnicas utilizadas en unos 50 países (King, 2004). A continuación, se resumen los enfoques principales de forma secuencial, ordenados según la tipología convencional seguida en el trabajo descriptivo de Diez y Burbano (2006).

- Los métodos Hidrológicos manejan unas concepciones del ecosistema fluvial simplistas para deducir un caudal ecológico mediante diversos tratamientos estadísticos de la serie de

caudales naturales representativa: análisis temporal, caudales clasificados, medias móviles, etc. Los flujos mínimos se expresan generalmente como un porcentaje de un estadístico de tendencia central, un percentil de la curva de duración, o bien asociado a una recurrencia definida. Los criterios concretados provisionalmente en Colombia para esta finalidad abordan unos esquemas operacionales análogos, como son el percentil 95 de la curva de duración de caudales medios diarios (Q95) sugerido en el Proyecto de Ley del Agua (Art. 21), o las opciones del Q97.5 y del 25% del caudal medio mensual menor incluidas en la Resolución explicativa del Índice de Escasez (MAVDT, 2004). Los limitados conocimientos técnicos y datos de entrada necesarios para una resolución veloz explican la aplicación profusa de estos procedimientos en contextos de escasa controversia, con distintas escalas operativas. Sin embargo, sus resultados rígidos y de baja resolución adolecen de una transferibilidad reducida en condiciones ecohidrológicas disimilares a las que cimentaron sus formulaciones. En consecuencia, pensamos que una legislación avanzada debe apuntar hacia planteamientos más comprensivos, rigurosos y propiciatorios de POMCA consensuados.

- Los conocidos como métodos Hidráulicos analizan los cambios de alguna variable hidráulica con el caudal, en secciones transversales representativas de áreas críticas por su relevancia o sensibilidad biogénica. Uno de los más aplicados en el ámbito mundial es el «Perímetro Mojado» (Nelson, 1980) que interpreta la relación entre esta variable y el caudal, presuponiendo que la integridad del hábitat fluvial está ligada al área mojada del biotopo en los ambientes «rápidos». El caudal ecológico se identifica por un cambio de pendiente en la curva marcado, en un rango de flujos que aseguran la idoneidad de los rápidos, y por extensión la habitabilidad en el resto del tramo. A pesar del mayor esfuerzo de caracterización y análisis de estos enfoques, sus resultados siguen siendo poco flexibles y detallados, por lo cual su aplicación ha sido superada por sistemas que incorporan de mejor modo los requerimientos biológicos.

- Los avanzados modelos Ecohidráulicos integran la mejor práctica para determinar RCA. En esencia, evalúan la cantidad e idoneidad del hábitat acuático utilizable para un organismo objetivo, bajo múltiples regímenes hidrológicos y distintos escenarios de estructura biológica configurables. Existen métodos particulares para entornos geográficos y ecosistemas únicos, como el «WRRRI Cover» para la trucha en arroyos de montaña (Wesche et al., 1987); el «Método Vasco» (Docampo y García de Bicuña, 1993) aplicable en ese territorio español; y los métodos de «California» (Waters, 1976) y «Oregón» (Loar y Sale, 1981) para salmónidos de ríos locales. Para un rango extenso de condiciones ambientales, la metodología genérica IFIM («Instream Flow Incremental Methodology») promovida por el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EEUU (USFWS, Bovee y Milhous, 1978) es la más aceptada, contrastada y difundida actualmente en el ámbito mundial para concertar RCA (Dunbar et al., 1998). IFIM es un sistema de apoyo a la decisión multidisciplinar y estándar, para evaluar a escala espacial y temporal los efectos provocados por diferentes alternativas de gestión hídrica en la disponibilidad de hábitat fluvial utilizable. IFIM es la herramienta preferida por muchos gestores, debido a la mayor resolución espacial-temporal de sus resultados y la menor incertidumbre de sus recomendaciones. Hemos juzgado interesante investigar la capacidad de IFIM en Colombia, abordando el análisis de un problema real típico de captaciones en ríos, el cual describimos a continuación.

### 3. APLICACIÓN DE IFIM EN COLOMBIA: RÍO PALACÉ (CAUCA) – NUEVO ACUEDUCTO DE POPAYÁN

La exigencia hídrica creciente de una ciudad en expansión como es Popayán ha motivado la construcción de un nuevo acueducto. Con la finalidad de abastecer adecuadamente las demandas estimadas para el año 2015, se construyó una bocatoma en el cercano río Palacé, para derivar un caudal de 500 l/s (Figura 1). El tramo fluvial donde se efectúa la detracción, presenta características típicas de ríos de gravas, con un cauce de anchura media de 18 m y una profundidad máxima de unos 1.5 m en condiciones normales. La pendiente media del 5‰ y la granulometría del material del lecho con predominio de cantos y bolos determinan un trazado sinuoso, con una secuencia clara de ambientes hidráulicos relativamente rápidos. La estación hidrométrica referencial de Puente Carretera (2602720; 1976- 2006) proporciona un caudal medio anual sin derivación de 7.37 m<sup>3</sup>/s, con módulos mensuales de 5.09 m<sup>3</sup>/s a 9.18 m<sup>3</sup>/s.





**Figura 1.**  
Localización del estudio de caudales ambientales IFIM en el río Palacé, Cauca.

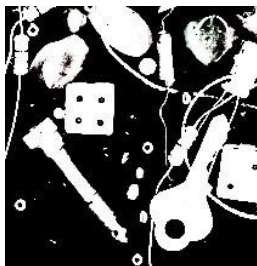
La caracterización fisicoquímica corrobora la buena calidad global del agua para la biocenosis fluvial. Los registros normales de las principales variables determinantes de la supervivencia de la ictiofauna son acordes con su ecología (Maldonado et al., 2005) y están fuera del rango referencial genérico de peligrosidad (Blanco, 1995). Las condiciones medias evaluadas incluyen, entre otros parámetros: temperatura del agua idónea (15°C), pH equilibrado (6.9), oferta de oxígeno disuelto suficiente (8.4 mg/l) con saturación adecuada (87%), y cantidad tolerable de sólidos disueltos totales (38 mg/l). La bioindicación con macroinvertebrados avala la calidad muy buena según el índice BMWP-Colombia (Zamora, 2005), y la evaluación oligo- mesotrófica revela un 76.5% de calidad óptima. Ambientes acuáticos favorables como este, simplifican un estudio de caudales ambientales considerablemente, al reducir las variables que condicionan la disponibilidad del hábitat físico interpretable.

El contexto vinculado a este tipo de proyectos hidráulicos propicia la aplicación de la metodología IFIM, habida cuenta de su capacidad contrastada para evaluar el efecto de diferentes alternativas de derivación en el ecosistema fluvial. El marco conceptual y operativo de IFIM expuesto en los manuales oficiales (Stalnaker et al., 1995; Waddle, 2001) y optimizado para ríos de Colombia por Diez y Burbano (2006) engloba cinco fases: 1) identificación y diagnosis, 2) simulación hidráulica, 3) modelación ecohidráulica espacial, 4) análisis ecohidrológico temporal y 4) adopción del RCA. La condición prototípica de esta investigación en los ríos de Colombia aconseja una descripción detallada del proceso.

### 3.1. Identificación y Diagnosis

En esta etapa se examinan los factores ambientales y socio- económicos afectados por la detracción, de modo que el RCA resulte lo más racional y comprensivo. El análisis legal e institucional identifica los colectivos perjudicados en alguna medida y deduce sus conductas previsibles durante la negociación. El modelo analítico LIAM «Legal-Institutional Analysis Model» (Lamb, 1998) que incluye IFIM para esta finalidad, establece el contexto negociador más probable (distributivo o regulativo), relacionando procedimentalmente las influencias evaluadas de todos los agentes (conocimiento del medio, recursos disponibles y fiabilidad). En este ejemplo, algunas colectividades y entidades consideradas han sido: resguardos indígenas (Paeces), población campesina, CRC, Acueducto y Alcantarillado de Popayán ESP, Concejo de Popayán, INCORA, SENA, grupos ecologistas, etc.

Durante el análisis físico, se delimita el tramo fluvial representativo de la alteración, los factores del medio impactados y la situación previa al proyecto. Se estudian las características del macro- hábitat vinculado al segmento fluvial, atendiendo al régimen de caudales, la dinámica fluvial, el régimen de temperaturas del agua y su calidad. Con mayor resolución espacial, se inventarían los diferentes meso- hábitats, caracterizados por unos ambientes hidráulicos de menores dimensiones que albergan estrategias ecológicas particulares.



Con objeto de caracterizar el recorrido del Palacé afectado por la detracción, se ha localizado un «tramo representativo» aguas abajo de la bocatoma, que contiene el patrón característico de variación secuencial de hábitats de modo suficiente (Figura 2). Estos 500 m de longitud fluvial se han establecido siguiendo los criterios contrastados de Simonson et al. (1994) para ríos pequeños, que recomiendan unas distancias en torno a 25 veces el ancho medio del cauce. El protocolo de caracterización fluvial siguió las pautas convencionales (Trihey y Wegner, 1981), incorporando unas pruebas suplementarias para controlar la calidad de la información hidrotopográfica (referencia y error topográfico, registro de variables hidráulicas, chequeo de medidores, y registro fotográfico).

La heterogeneidad espacial causada por la distribución longitudinal de meso- hábitats (Roussel y Bardonnnet, 1997) se integró mediante un conjunto de secciones transversales en ubicaciones seleccionadas. Tipificamos como «rápido» al fragmento con control hidráulico de cauce, donde la superficie libre es prácticamente paralela al lecho y el flujo es somero (<40 cm) y rápido (>60 cm/s). La «tabla» suele formarse aguas arriba de un rápido y no presenta remanso ni obstrucciones, de modo que la corriente es menos agitada, veloz y algo más profunda (40-70 cm). Una «poza» presenta control hidráulico de cauce, que produce un remanso marcado con flujo lento (<40 cm/s) y profundo (>70 cm).



**Figura 2.**  
*Fragmento del tramo modelado en el estudio IFIM de río Palacé (Cauca), aguas abajo de la bocatoma del nuevo acueducto de Popayán. Incluye una secuencia de meso-hábitats con flujos turbulentos (rápidos) y menos agitados (tablas).*

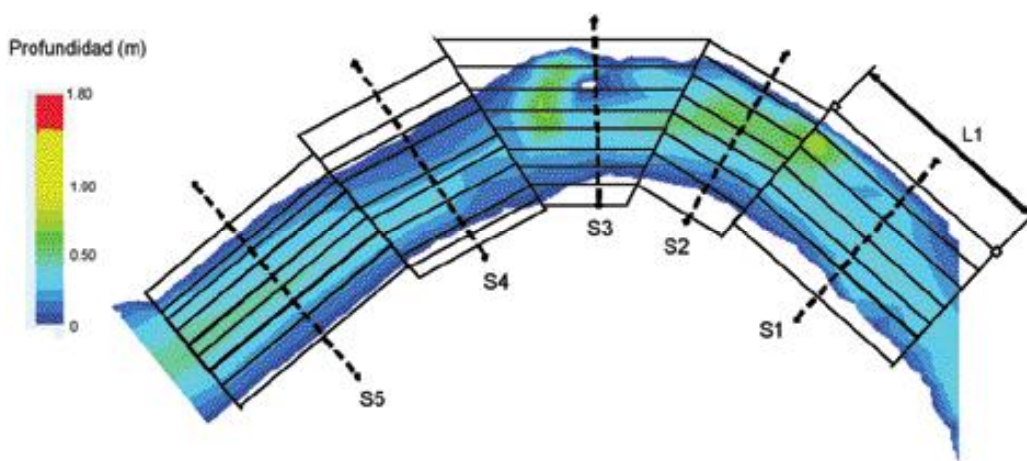
El levantamiento topográfico de cada sección transversal se ha realizado con nivel y mira, estableciendo un mínimo de veinte estacionamientos espaciados un metro aproximadamente, excepto cuando alguna particularidad hidrotopográfica precisó de puntos complementarios. El aforamiento de las secciones se efectuó con molinete hidráulico de hélice conforme a las directrices estándar (Rantz, 1982), calculando la velocidad media en cada una de las verticales topográficas a partir de un número variable de mediciones puntuales: a 6/10 de la superficie libre cuando la profundidad es menor de 75 cm; media aritmética de las lecturas a 2/10 y 8/10 con profundidades entre 75 cm y 120 cm; y media ponderada de tres mediciones (2/10, 8/10 y 6/10) con doble peso a la última, con profundidades mayores de 120 cm o distribuciones verticales de velocidades atípicas. En cada sección transversal se han registrado las Cotas de la Lámina de Agua (CLA) y las distribuciones horizontales de velocidades medias completas correspondientes a tres caudales característicos: 1) el bajo, dentro del rango natural (4.86 m<sup>3</sup>/s); 2) el alto, limitado por una condiciones de seguridad aceptables (8.70 m<sup>3</sup>/s); y el 3) intermedio, entre las descargas anteriores (6.24 m<sup>3</sup>/s).

### 3.2. Modelación Hidráulica

El proceso convencional de IFIM resuelve métodos numéricos unidimensionales (1D) para regímenes permanentes uniformes o gradualmente variados, con la finalidad de predecir los campos de las variables hidráulicas determinantes del hábitat físico que genera cada uno de los caudales evaluados. Hemos desarrollado una discretización del dominio computacional mediante un conjunto de secciones transversales, que conforman una malla estructurada de prismas rectos cuadrangulares con resolución ecohidráulica ventajosa (Figura 3). Cada elemento posee una rugosidad definida por su granulometría identificada en campo, que se ha utilizado para simular secuencialmente las correspondientes profundidades y velocidades medias para múltiples descargas.

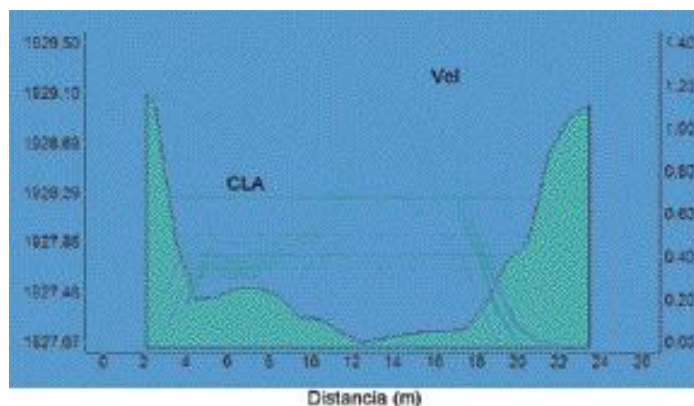
Las variables micro- hidráulicas han sido simuladas en el Palacé para unos flujos permanentes y uniformes, aplicando modelos convencionales reunidos en IFIM (Waddle, 2001) con el paquete informático RHABSIM 3.0 en Español (Payne y Diez, 2005). Las profundidades predichas en todas las celdas de una sección para un caudal simulado (Q), vienen determinadas por la correspondiente Cota de la Lámina de Agua (CLA) deducida de la curva de calibración. Los perfiles hidráulicos han sido calculados mediante una combinación de los modelos STGQ y MANSQ, configurados adecuadamente para cada sección. STGQ desarrolla un simple ajuste de regresión lineal bi- logarítmica de mínimos cuadrados entre las tres observaciones Q-CLA. Con mayor rigor conceptual, MANSQ resuelve en cada sección una expresión conjunta de las ecuaciones de continuidad y de Manning, considerando la variación inherente de la rugosidad con el caudal en corrientes naturales, de acuerdo al patrón obtenido en la calibración. El intervalo de simulación estudiado (2m<sup>3</sup>/s - 17m<sup>3</sup>/s) respeta la limitación estipulada para estos modelos, entre el 40% del caudal bajo y el 250% del alto (Bovee y Milhous, 1978).

**Figura 3.** Esquema simplificado de la caracterización fluvial utilizada para la modelación ecohidráulica IFIM. A modo de ejemplo, un fragmento fluvial se representa mediante cinco secciones transversales, divididas en múltiples celdas computacionales (normalmente más de 20). El dominio acuático queda discretizado por una malla de elementos prismáticos (trapezios en planta). La sección S1 representa un tramo rectilíneo de longitud L1, dividido en celdas rectangulares. Por claridad, se dibujan pocas celdas muy anchas.



Para simular las velocidades medias en las celdas, se conceptúa la sección transversal como compuesta de múltiples subsecciones, en cada una de las cuales gobierna el flujo permanente y uniforme presupuesto. La configuración que hemos fijado en la modelación matemática es común para todas las secciones, y consiste en una combinación de los modelos «3-vel» y «1-vel» de IFIM (Waddle, 2001). Los algoritmos de «3-vel» ajustan una regresión bi-logarítmica entre la velocidad media en una celda y el caudal total. El método «1-vel» concibe un flujo 1D estricto en cada celda, que se modela mediante una expresión conjunta simplificada de las ecuaciones de Manning y de continuidad (equiparando el radio hidráulico con la profundidad). Las rugosidades deducidas de una distribución de velocidades observada, se consideran invariables durante la simulación, dejando que el balance de masas produzca unas velocidades ajustadas que sean coherentes con el flujo permanente. Hemos optimizado la información hidrotopográfica necesaria para la calibración, siguiendo las recomendaciones de Payne (2003) corroboradas por Diez y Burbano (2006): el modelo «3-vel» se aplicó en el intervalo de interpolación entre los caudales observados; el «1-vel» calibrado con el caudal alto predijo el intervalo de extrapolación superior; y el «1-vel» calibrado con el caudal bajo efectuó la extrapolación inferior.

El producto de esta simulación hidráulica en el río Palacé incluye: 1) los perfiles hidráulicos, que determinan los campos de profundidades; y 2) las distribuciones horizontales de velocidades en cada sección, que conforman los campos de velocidades (Figura 4). Los errores de predicción de las CLA han variado en torno al valor relativo del 1% y entre absolutos los 6 mm y 15 mm. Las velocidades simuladas incluyen unos desatinos en torno a los 5 cm/s, y normalmente son menores del 19%. Estos hechos resultan coherentes con lo observado en ambientes fluviales comparables por otros investigadores (Diez, 2004; Waddle, 2001).



**Figura 4.** Simulación hidráulica de la sección representativa inferior (tabla rápida) que resulta necesaria para el análisis IFIM: a) Cotas de Lámina de Agua (CLA) predichas con el modelo MANSO; y b) distribuciones horizontales de velocidades (Vel) calculadas con una combinación conveniente de los modelos "3-vel" y "1-vel". Ejecutada con el programa RHABSIM 3.0 en Español (Payne y Díez, 2005)

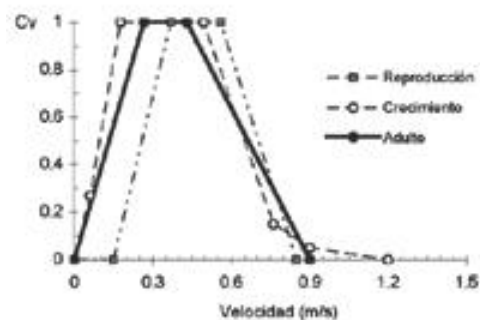
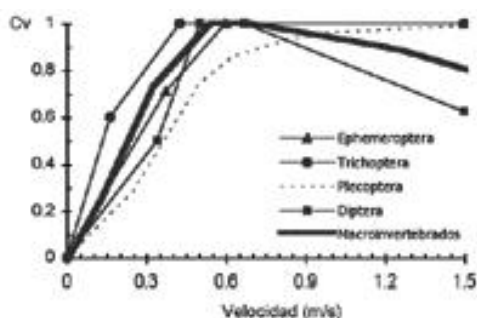
### 3.3. Modelo Biológico de Idoneidad de Hábitat

La herramienta analítica IFIM fue desarrollada para evaluar los efectos de alteraciones del caudal natural sobre la disponibilidad de hábitat físico para algún organismo objetivo. Desde sus primeras aplicaciones en arroyos del oeste de EEUU con ictiofauna comercial salmonícola, IFIM ha facilitado la gestión fluvial en un rango amplio de condiciones ecohidráulicas y enfocada a diversos organismos con preferencias estudiadas. El componente biológico de IFIM reside en unos criterios de idoneidad del hábitat en forma de «curvas de preferencia», que expresan el grado de adecuación de un organismo respecto a las variables que determinan su hábitat físico, evaluado con un coeficiente que varía de cero a uno. Habitualmente, se procesan curvas de ictiofauna (comercial o ecosistémica), aunque también existen criterios de insectos acuáticos, crustáceos, moluscos, reptiles, anfibios, mamíferos, aves y perifiton.

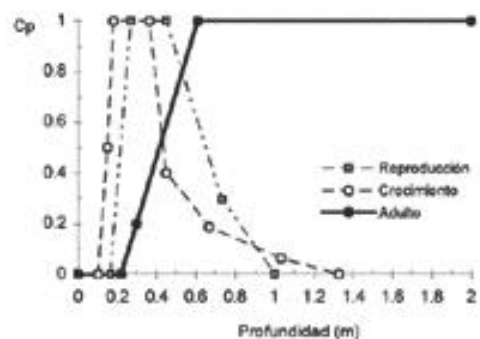
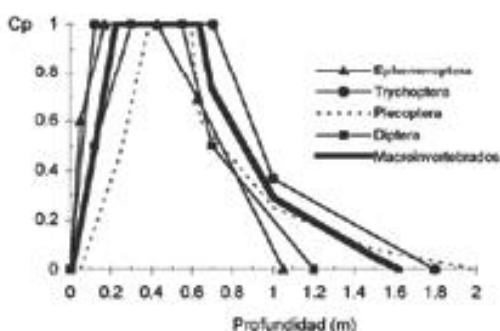
La comunidad íctica en el sector derivado del Palacé agrupa las especies identificadas en el estudio de González y Sanclemente (1998): Sardinas (*Astyanax fasciatus* y *Bryconamericus caucanus*), Negrito (*Astrolepis grimaldii*), Corroncho (*Ancistrus caucanus*), Sabaleta (*Brycon henni*), Viringo (*Sternopygus macrurus*) y Trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*). Esta última especie exótica es dominante y encuentra las condiciones naturales propicias para su desarrollo. El muestreo de los macroinvertebrados acuáticos de Campo y Ruiz (2001) refleja una diversidad notable (índice Shannon-Weaver=2.21), encontrando 17 géneros bioindicadores, 13 de los cuales son representativos de aguas limpias y bien oxigenadas según el sistema BMWP (Zamora, 2005). Estos géneros pertenecen a los órdenes siguientes: Plecoptera (2), Trichoptera (5), Ephemeroptera (6) y Diptera (1). La comunidad de macroinvertebrados presenta una estructura medianamente optimizada (56.6%), con una densidad buena (68.8%).

En ausencia de criterios de idoneidad específicos para los organismos anteriores, y en el contexto de información limitada acerca de sus requerimientos de hábitat, hemos diseñado unas curvas de preferencia particularizadas. Combinando las preferencias genéricas de los órdenes de macroinvertebrados anteriores, de acuerdo a las investigaciones recopiladas por Jowett (1998) en ríos foráneos, hemos esbozado una curva de preferencia gremial interpolada (Figura 5). Para la ictiofauna, hemos adaptado los criterios contrastados de la trucha arco iris en ríos de EEUU (Bovee, 1986), para representar globalmente una comunidad en la que predomina y seguramente perviva. Integrando el conocimiento actual sobre la biología y ecología de estos peces en Colombia (Maldonado et al., 2005), hemos delineado las curvas de preferencia global para los estadios básicos: adulto, crecimiento y reproducción (Figura 6). Las similitudes encontradas entre algunas estrategias de la trucha y de las emblemáticas sabaleta y sardina (alimentación, reproducción, preferencia de granulometría y temperatura del agua) respaldan una coherencia razonable de este procedimiento analítico. En cualquier caso, es evidente que la incertidumbre inherente a una simplificación de este tipo se puede minimizar con un mayor conocimiento del sistema hidrobiológico, relativo a la dinámica trófica y las interacciones entre poblaciones y comunidades.

**Figura 5.**  
Composición de las curvas de preferencia genéricas univariadas para los macroinvertebrados acuáticos del río Palacé: velocidad media y profundidad. Basada en la información recopilada por Jowett (1999).



**Figura 6.**  
Curvas de preferencia genéricas univariadas para los tres estadios básicos de la ictiofauna del río Palacé. Basadas en la información biológica y ecológica comparada de la trucha (Bovee, 1986) y de las especies locales (Maldonado et al., 2005).



### 3.4. Modelación Ecohidráulica Espacial: PHABSIM

El núcleo de IFIM es el sistema de simulación del hábitat físico PHABSIM («Physical Habitat Simulation System»), que combina con lógica los campos hidráulicos simulados con las curvas de preferencia estipuladas, para evaluar el hábitat fluvial en términos de cantidad y calidad. PHABSIM presupone que la disponibilidad de hábitat físico es el principal condicionante y el único limitante de la actividad vital y de la dinámica poblacional de la especie objetivo. Esta premisa se ha comprobado en numerosas ocasiones (Bovee et al., 1997; Gippel y Stewardson, 1995), si bien pueden existir otros factores reguladores de la población, como la: disponibilidad de alimento, proximidad a los frezaderos, calidad del agua, competencia, o predación (Hegge et al., 1993). No obstante, como el hábitat físico es una condición necesaria para la biocenosis (Milhous, 1999), PHABSIM es un indicador conveniente de la potencialidad biogénica de un río.

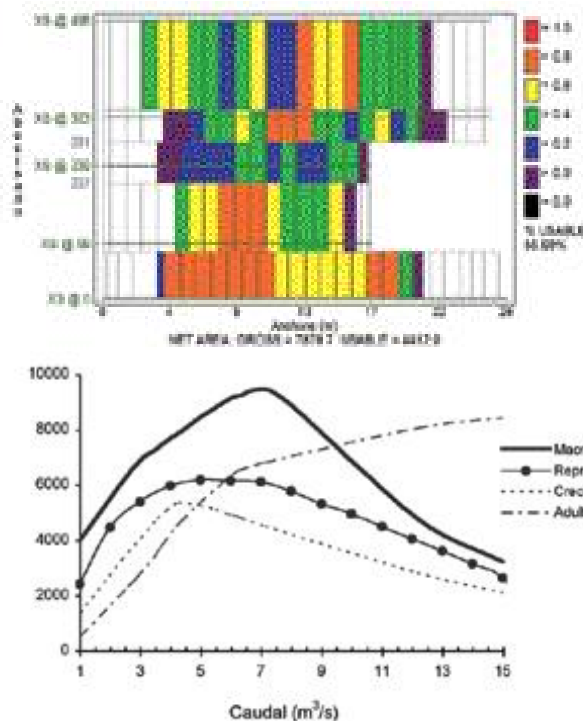
El proceso comienza con el cálculo de la idoneidad conjunta de cada celda (i), expresada como un «Coeficiente de Conformidad» ( $C_i$ ) agregador de las idoneidades individuales de las variables estudiadas (Figura 7). Hemos empleado la combinación multiplicativa estándar de los coeficientes de velocidad ( $C_{vi}$ ) y profundidad ( $C_{pi}$ ), ya que el material del lecho operaría sólo como un factor de escala:  $C_i = C_{vi} \cdot C_{pi}$ . Agregando ahora las contribuciones de todas las celdas mojas de una sección transversal durante un caudal, se calcula el Índice de Hábitat de Sección (IHS), que expresa la aptitud ecohidráulica de esa unidad morfodinámica. La calidad y cantidad del hábitat acuático utilizable para un organismo durante una descarga modelada se evalúa mediante el Índice de Hábitat Total (IHT), ponderando todos los IHS en función de las respectivas longitudes fluviales representadas ( $L_i$ ):  $IHT = \sum IHS_i \cdot L_i$  (ver Fig.3). El IHT se expresa como área utilizable en 1 km fluvial ( $m^2/km$ ). Repitiendo este proceso con cada uno de los flujos analizados (Q) en el Palacé, y con las curvas de preferencia de macroinvertebrados e ictiofauna, hemos obtenido las conocidas relaciones Q-IHT que se interpretan en los estudios IFIM (Figura 8).

El aspecto de las curvas resulta coherente con el régimen hidrológico local previo al proyecto, habida cuenta que los intervalos óptimos para todos los organismos abarcan los caudales medios mensuales normales. Las formas de las curvas de reproducción y macroinvertebrados son parecidas, debido probablemente a la vinculación de ambos organismos con características definidas del material del lecho. Los caudales óptimos para los peces adultos ( $6.21 m^3/s$ ) aparecen relativamente próximos al caudal medio anual ( $7.37 m^3/s$ ), y es un estadio favorecido durante todo el año ( $5.1 m^3/s-9.2 m^3/s$ ). El distanciamiento perceptible entre los intervalos

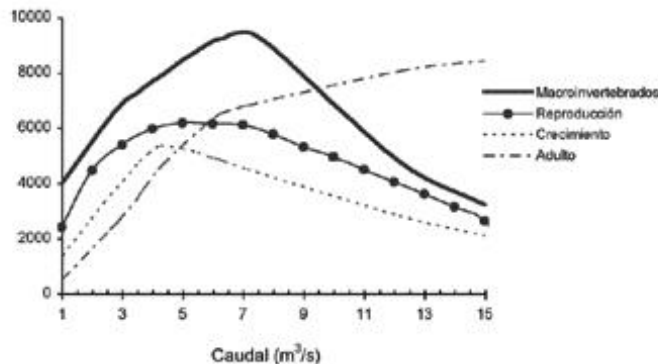


idóneos para los adultos y para el crecimiento (4.28 m<sup>3</sup>/s), pensamos se debe a las menores dimensiones de los alevines, que los hacen vulnerables a las condiciones hidráulicas exigentes habituales, lo que explica parcialmente su ausencia en el tramo. Existe una separación apreciable entre los caudales optimizados ecológicamente para la fase adulta (6.21 m<sup>3</sup>/s) y para los macroinvertebrados (7.26 m<sup>3</sup>/s), que entendemos está causada por alguna dinámica ecológica menos representada en este análisis temporal limitado, con criterios simplificados.

Estos resultados revelan que la comunidad más sensible y vulnerable a los cambios de caudal en el río Palacé son los macroinvertebrados, debido a que su curva incluye, en el intervalo de caudales ordinarios, dos ramas con mayor pendiente. Estas relaciones Q-IHT del análisis espacial ecodinámico son un resultado fundamental del estudio IFIM, que se integrarán seguidamente en el análisis temporal ecodinámico, para deducir el RCA científicamente argumentado.



**Figura 7.** Discretización analítica IFIM de un fragmento fluvial del tramo representativo. Las idoneidades de las cadenas tróficas ( $Q-IHT$ ) para los macroinvertebrados están codificadas en colores. La oferta ecodinámica de hábitat utilizable para estos organismos es del 56%. Ejecutado con RHABSIM 3.0 (Payne y Diez, 2005).



**Figura 8.** Relaciones Caudal - Índice de Hábitat Total ( $Q-IHT$ ) del río Palacé aguas abajo de la bocatoma para el nuevo acueducto de Popayán (Cauca), para las comunidades de macroinvertebrados y tres estadios básicos de la ictiofauna (reproducción, crecimiento y adulto). Las inflexiones y cambios de pendiente delimitan unos intervalos de caudales idóneos para los organismos, que deben interpretarse con juicio profesional. Ejecutado con RHABSIM 3.0.

### 3.5. Modelación Ecodinámica Temporal

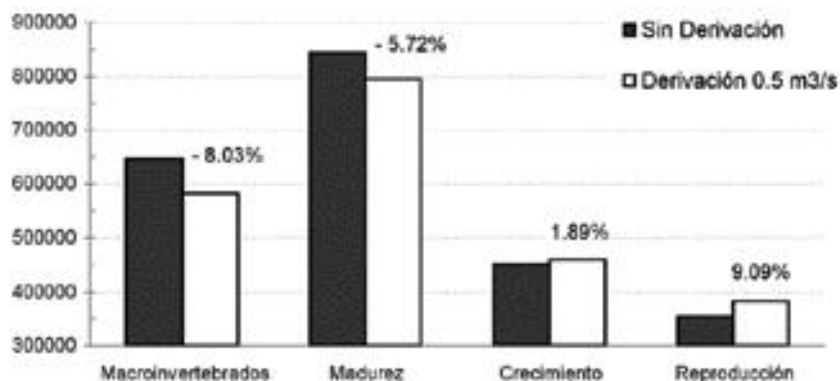
La consecución de un RCA viable es el colofón de una negociación cooperativa, en la que todos los colectivos implicados en la planificación hídrica de una cuenca (POMCA) encuentran satisfechos sus intereses de modo razonable. Esta fase de IFIM evalúa los efectos temporales sobre el ecosistema acuático provocados por las diferentes alternativas planteadas, con la finalidad de optimizar un RCA en términos de efectividad, factibilidad, riesgo y valoración económica. Para ello, se escrutan los resultados de dos herramientas analíticas prácticas: las series temporales de hábitat y los histogramas de hábitat acumulado. La Serie temporal de Índice de Hábitat Total (SIHT) representa la variación del índice de hábitat (IHT) en el tiempo, bajo una alternativa determinada. Su interpretación puede complicarse cuando el fomento de un organismo acarrea el retroceso de otro. Agregando las ordenadas de la SIHT de un organismo durante un periodo definido, se obtiene su respectivo IHT Acumulado (IHTA).

Los escenarios contemplados en la detración del Palacé son dos. (1) La línea base referencial se establece mediante el régimen de caudales sin derivación. (2) La alternativa perturbadora extrae un caudal permanente de 500 l/s durante todos los meses. La figura 9 presenta las respuestas comparadas de ambos escenarios, en términos de IHTA para los cuatro organismos objetivo. Estos resultados generados con el paquete RHABSIM 3.0 evidencian

que la derivación proyectada provoca un impacto global sobre el hábitat fluvial físico poco significativo, lo cual era previsible para una extracción limitada del 6.78% del módulo anual.

Figura 9.

Comparación de los Histogramas del Índice de Hábitat Total Acumulado (IHTA) en la modelación IFIM del río Palacé (Cauca). Se presentan las respuestas de los escenarios sin derivación y con derivación de 500 l/s, para las comunidades de macroinvertebrados y tres estadios de la ictiofauna. Las cifras porcentuales representan la variación relativa provocada por la detección.

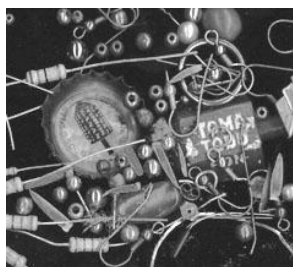


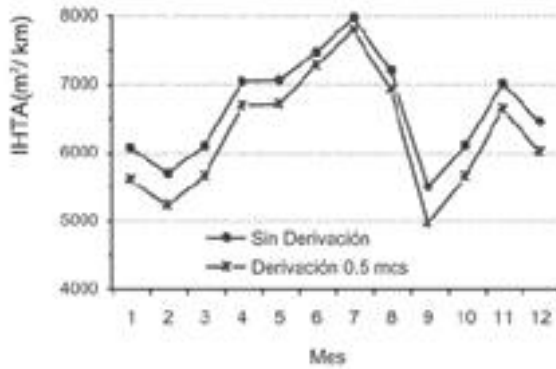
Los estadios de crecimiento y reproducción experimentan un aumento de oferta de hábitat perceptible. El incremento global para el crecimiento de la ictiofauna del 1.89% resulta muy poco significativo en todos los meses. La potencialidad para la freza mejora un 9.09%, lo que juzgamos es causado por las nuevas condiciones hidráulicas menos exigentes en la columna de agua y en el lecho. En cualquier caso, la morfología del tramo lo hace muy poco apto para la freza y el alevinaje, como lo demuestra la ausencia de ejemplares durante los muestreos. Por lo tanto, estos organismos no resultarán influyentes en la toma de decisiones.

La reducción global del hábitat acumulado para los adultos es leve (5.72%), pero merece el escrutinio de las series SIHT de la Figura 10. La demostrativa gráfica patentiza que en todos los meses se disminuye el hábitat en el rango del 2% al 8%. La restricción se acentúa cuanto menos caudaloso es el mes, debido a que los ambientes más someros y rápidos desfavorecen la actividad de reposo. Para la nueva condición del mes más sensible de septiembre (4.59 m3/s), se ha comprobado la franqueabilidad hidráulica del tramo para los juveniles y adultos, ya que la profundidad más limitante de todas las secciones (46 cm) es traspasable.

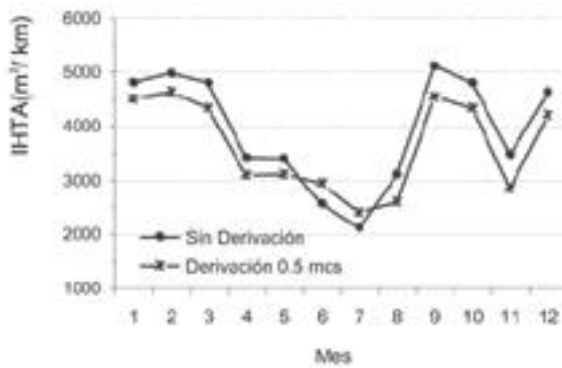
La disminución de la potencialidad del hábitat para los macroinvertebrados es limitada (8.03%), pero de mayor relevancia. Como esta comunidad es la más vulnerable a la regulación hídrica, constituye un buen bioevaluador de caudales ambientales para el río Palacé. La forma particular de la curva Q-IHT (Fig.8) determina un decremento de hábitat en los meses cuyos caudales están incluidos en la rama ascendente ( $Q < 7.26$  m3/s), y un incremento en los vinculados a la rama descendente. En consecuencia, comparando las series de hábitat sin y con detección (Figura 11) se detecta una reducción de hábitat continua excepto en los dos meses más caudalosos (junio y julio), con variaciones mayores que para la madurez íctica (del 7% al 18%). Este paradójico aumento transitorio de la oferta física pensamos se justifica por las nuevas condiciones hidráulicas aplacadas, que propician un micro-entorno en el medio intersticial algo más satisfactorio.

En resumen, el régimen hídrico ligado a la derivación del 6.78% del caudal medio anual del río Palacé impacta levemente sobre la calidad global del ecosistema fluvial evaluada con IFIM. El manejo de los caudales del Palacé ligado al desvío de 500 l/s salvaguarda los requerimientos ecosistémicos aguas abajo de la bocatoma, por lo que dictaminamos se trata de un Régimen de Caudales Ambientales avalador del proyecto. De modo complementario, se deberán establecer programas de seguimiento, para generar una información experimental valiosa con la que evaluar las recomendaciones y validar adecuadamente esta metodología. Adicionalmente, otros componentes potencialmente nocivos de este proyecto en el Palacé, deberían ser evaluados también durante el licenciamiento: verbigracia, el dispositivo para paso de peces preciso para evitar el «efecto barrera» del vertedero sobre los peces y otros organismos acuáticos.





**Figura 10.** Series temporales del Índice de Hábitat Total (SIHT) para la el estadio adulto de la ictiofauna del río Palacé, evaluadas en el estudio IFIM de la derivación de 500 l/s para el nuevo acueducto de Popayán.



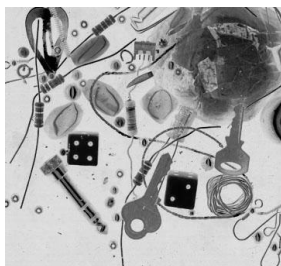
**Figura 11.** Series temporales del Índice de Hábitat Total (SIHT) para los macroinvertebrados acuáticos del río Palacé (Cauca), evaluadas en el estudio IFIM de la derivación de 500 l/s para el acueducto de Popayán.

#### 4. COMENTARIOS SOBRE LA DETERMINACION IFIM DE RCA

Colombia experimenta una explotación creciente de sus ríos, pero carece de reglamentación y pautas científicas para calcular caudales ambientales confiables. Pensamos que este análisis IFIM del río Palacé representa un referente valioso para la determinación avanzada de caudales ambientales en el contexto de la planificación ambiental de cuencas en Colombia (POMCA). Aunque IFIM no es la panacea para resolver las licencias ambientales de obras hidráulicas en Colombia, es indudable que su solidez conceptual proporciona la potencia y flexibilidad necesaria para encontrar soluciones racionales y comprensivas en los conflictos por el uso del agua superficial.

Varios aspectos de la metodología IFIM- PHABSIM han sido criticados, y sus limitaciones deben respetarse para una interpretación acertada. Respecto a la modelación hidráulica, Shirvell (1986) ha estudiado el efecto de la anchura de las celdas en la exactitud de las predicciones de profundidad y velocidad, encontrando que cuando la anchura de la celda es 1/30 la del cauce, el error es del 15% para la velocidad y del 14% para la profundidad; cuando se reduce a 1/8 del cauce, la imprecisión aumenta hasta el 29% y 36%, respectivamente. La sensibilidad de PHABSIM a los errores aleatorios en la medición de velocidades ha sido investigada por Morhardt (1984), detectando que PHABSIM es muy poco sensible y apenas hay efecto en las curvas Q-IHT. La capacidad predictiva de los modelos hidráulicos de PHABSIM y su influencia en la evaluación del hábitat se examina en sucesivos trabajos de Diez (2004, 2005, 2006a). Sus numerosas modelaciones de ambientes morfodinámicos básicos (rápidos, tablas y remansos de tramos de alta, media y baja pendiente), detectan errores en las profundidades menores del 2% y precisiones en las velocidades dependientes del número de mediciones empleadas en la calibración. El mecanismo amortiguador del cálculo del IHT detectado, posibilita obtener relaciones hábitat-caudal confiables basadas en simulaciones de velocidades calibradas con una sola medición en campo.

En cuanto a los criterios de idoneidad, IFIM presupone la independencia de las variables del hábitat respecto a su influencia en la selección del micro- hábitat que realiza el organismo. Aunque esta suposición se ha comprobado inválida en algunos casos (Gowan, 1984), los creadores de PHABSIM sugieren que esta interacción generaría tan sólo un error entre el 6% y el



15% en la estimación del IHT (Shirvell, 1986). La unicidad de las curvas de preferencia ha sido cuestionada, al demostrarse que una misma población de un río produce respuestas diferentes dependiendo de: el método de localización de organismos (Bain et al., 1982), la época y momento del muestreo (LeDrew et al., 1996), la actividad y el tamaño del organismo (Probs et al., 1984), la composición del ecosistema (Schlosser, 1987), la cantidad de hábitat aprovechable (Orth y Maughan, 1982) y el tratamiento de los datos (Cheslak y García, 1988).

El procedimiento de cálculo del Índice de Hábitat ha sido bastante debatido. El cálculo de la idoneidad conjunta de una celda genera resultados diferentes según el método de agregación empleado, con discrepancias variables dependiendo de las curvas de preferencia (Morhardt, 1986). En consecuencia, el modelador debe seleccionar con sensatez y rigor el algoritmo que mejor refleje la capacidad de carga real del sistema, ya que una elección arbitraria podría desacreditar el estudio IFIM. Uno de los interrogantes habituales de los gestores del agua es la cantidad de peces obtenida por volumen de caudal ecológico, que implícitamente alude a una relación entre el IHT y el tamaño-biomasa de una población. Los ajustes comprobados IHT-tamaño (Orth y Maughan, 1982) son inmejorables con estadios de salmónidos limitados por el espacio disponible (Wickett, 1958). El diferente grado de éxito de los ajustes IHT-biomasa (Conder y Annear, 1987; Marthur et al., 1985) demuestra la existencia de procesos adicionales espacio-temporales que son determinantes.

La aplicación de IFIM en ríos de Colombia deberá configurarse específicamente para unas condiciones ecohidráulicas disimilares a las que fundamentaron su desarrollo conceptual, lo cual suscita líneas de investigación sugestivas. Los avances de la tecnología telemétrica y de la hidroinformática computacional de fluidos posibilitan la caracterización del dominio fluvial mediante esquemas multidimensionales (2D-3D) de alta resolución espacial, los cuales se han aplicado con éxito en la modelación eco-hidrodinámica PHABSIM del río Magdalena en su tramo bajo (Diez, 2006b).

## 5. CONCLUSIONES

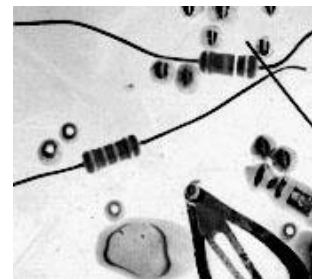
La carencia actual de métodos acreditados para determinar unos Regímenes de Caudales Ambientales integrables en los POMCA de Colombia, acentúa la perentoriedad de programas de investigación específicos que sean ambiciosos y estables. La aceptación científica superior de la metodología IFIM en el ámbito mundial, ha motivado este ensayo modélico en Colombia, para evaluar la detracción del río Palacé incorporada en el nuevo acueducto de Popayán, con criterios hidrobiológicos defendibles. La modelación Ecohidrológica IFIM del tramo aguas abajo de la bocatoma (500 m) revela que la derivación ejecutada de 500 l/s menoscaba la integridad hidrobiológica de modo leve y tolerable por el ecosistema del Palacé. Los requerimientos de flujo evaluados con PHABSIM para las comunidades representadas (macroinvertebrados y estadios básicos de la ictiofauna) superan con creces los caudales ecológicos calculados por métodos conocidos más simples. En consecuencia, la detracción limitada del 6.78% del caudal medio anual con la que opera el proyecto del nuevo acueducto de Popayán conforma un Régimen de Caudales Ambientales satisfactorio.

IFIM posee un potencial importante para determinar los RCA cimentadores de unos POMCA en Colombia auténticamente ambientales. Aunque IFIM tiene mucho que aportar en la planificación del agua superficial, no es la panacea: varios aspectos de sus componentes pueden ser perfeccionados y particularizados para los ambientes fluviales locales. Esta experiencia suscita líneas de investigación interesantes para un país cuyo dominio hidráulico sustenta ecosistemas con diversidades sobresalientes, que deben salvaguardarse con estrategias validadas.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Bain, M.B., Finn, J.T., Gerardi, L.J., Ross, M.R. y Saunders, W.P. 1982. An evaluation of methodologies for assessing the effects of flow fluctuations on stream fish. Massachusetts Cooperative Fishery Research Unit. University of Massachusetts. Amherst, Massachusetts, EEUU.
- Bovee, K.D. 1986. Development and Evaluation of Habitat Suitability Criteria for Use in the Instream Flow Incremental Methodology. Instream Flow Paper No. 21. Fort Collins (CO-EEUU).
- 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. Fort Collins (CO-EEUU).

- Bovee, K. D, Lamb, B.L., Bartholow, J.M., Stalnaker, C.B., Taylor, J. y Henriksen, J. 1997. Stream Habitat Analysis Using The Instream Flow Incremental Methodology. Information and Technology Report 1997-0003. U.S. Geological Survey, Biological Resources Division. Fort Collins (CO-EEUU).
- Blanco Cachafeiro, M.C. 1995. La Trucha, cría Industrial. Ed. Mundi Prensa. Madrid.
- Campo E., Y.F. y Ruiz C., D.H. 2001. Estimación del Régimen de Caudales Ecológicos en el río Palacé (Cauca). Tesis de Grado Biología, Universidad del Cauca. Popayán, Colombia.
- Cheslak, E.F. y García, J.C. 1988. An evaluation of the effects of various smoothing and curve-fitting techniques on the accuracy of suitability functions. Pp: 259-283, en: Proc. workshop development of habitat suitability criteria. Bovee, K. y Zuboy, J.R. (Eds). USFWS, Biological Report 88, 11 P.
- Conder, A.L. y Annear, C.A. 1987. Test of WUA estimates derived from a PHABSIM model from instream flow studies on trout streams. N. A Journal of Fisheries Management, 7: pp. 339-350.
- Diez H, J.M. 2004. The Influence of 1D Hydraulic Simulation on the PHABSIM Habitat Index. Proc. Fifth International Symposium on Ecohydraulics. Madrid, España. pp. 12-17
- Diez H, J.M. 2005. Análisis comparativo de los métodos de simulación hidráulica en PHASIM-IFIM y su influencia en la evaluación del hábitat fluvial. ProQuest-Information and Learning. España.
- Diez H, J.M. 2006a. Optimización de Datos Hidráulicos para los Estudios de Caudales Ecológicos. Actas XVII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Popayán. pp. 15-16
- Diez H, J.M. 2006b. Modelación Fluvial Multidimensional (1D-2D) Aplicada al Cálculo de Caudales Ecológicos. Actas XVII Sem. Nacional de Hidráulica e Hidrología. Popayán. pp. 15-16.
- Diez H, J.M y Burbano B., L. 2006. Técnicas avanzadas para la evaluación de Caudales Ecológicos en el ordenamiento de cuencas hidrográficas. Ingeniería e Investigación, 26 (1): pp. 58-68.
- Docampo, L. y García de B., B. 1993. The Basque Method for determining Instreams flows in Northern Spain. Rivers, 4(4): pp. 292-311.
- Dunbar, M.J., Gustard, A., Acreman, M.C. y Elliot, C.R. 1998. Overseas approaches to setting River Flow Objectives. Institute of Hydrology. R&D Technical Report W6-161. Wallingford, Reino Unido.
- Gippel, C.G. y Stewardson, M.J. 1995. Development of an environmental flow management strategy for the Thomson River (Victoria, Australia). Regulated Rivers: Research and Management, 10: pp. 121-136.
- González M, L.J. y Sanclemente P, M. 1998. Estudio de impacto ambiental del Proyecto Nuevo acueducto de Popayán - río Palacé. Corporación Regional del Cauca CRC. Popayán, Colombia.
- Gowan, C. 1984. The impacts of irrigation water withdrawals on brown trout (*Salmo trutta*) and two species of benthic macroinvertebrates in a typical southern Michigan stream. Tesis M.Sc., Michigan State University. Michigan, EEUU.
- Hegge, O., Hesthagen, T. y Skurdal, J. 1993. Juvenile competitive bottlenecks in the production of brown trout in hydroelectric reservoirs due to intraspecific habitat segregation. Regulated Rivers, 8: pp. 41-48.
- IDEAM. 2004. Metodología para el cálculo del Índice de Escasez. Proyecto SIMA-OEA, Lima, Perú.
- Jowett, I.G. 1998. Survey and Analysis of Instream Habitat. NIWA. Hamilton, New Zealand.
- King, J. 2004. Environmental Flows for Fluvial Maintenance and Conservation. Proc. Fifth International Symposium on Ecohydraulics. 12-17/09/2004, Madrid, España. pp. 25-37.
- Lamb, B.L. y Doerksem, H.R. 1987. Instream water use in United States – water laws and methods for determining flow requirements. In National Water Summary 1987. Water Supply Paper 2350, US Geological Survey: Washington, D.C. pp. 109-116.
- Lamb, B. L., Burkardt, N. y Lybercker, D.L. 1998. Decision Analysis Tools: Use of the LIAM. En: Global Environmental Policy and Administration. Oden, D.L. y Steel, B.S (Eds). Marcel-Dekker. New York.
- Ledrew, L.J., Scruton, D.A., McKinley, R.S. y Power, G. 1996. A comparison of habitat suitability indices developed from daytime versus nighttime observations of atlantic salmon in a regulated newfoundland stream. En: Proceedings of the 2nd international symposium on habitat hydraulics. INRS-Eau. Quebec, Canadá. pp: B33-B44,
- Loar, J.M. y Sale, M.J. 1981. Analysis of Environmental Issues Related to Small Scale Hydroelectric Development, V: Instream Flow Needs for Fishery Resources. Publ. 1829. Environmental





- Science Division, Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, Tennessee, EEUU.
- Maldonado O, J.A., Ortega L, A., Usma O, J.S., Galvis V, et al. 2005. Peces de los Andes de Colombia, Guía de Campo. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, Colombia.
- Marthur, D., Bason, W.S., Purdy, E.J. y Silver, C.A. 1985. A critique of the Instream Flow Incremental Methodology. *Canadian Journal of Fish Aquatic Science*, 42: pp. 825-831.
- Milhous, R.T. 1999. History, Theory, use, and limitations of the Physical Habitat Simulation System. *Proc. 3rd International Symposium on Ecohydraulics*. Salt Lake City, Utah, EEUU.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia. 2004. Resolución 0865 de 2004, Metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia. 2005. Proyecto de Ley del Agua. <http://www.miniambiente.gov.co>.
- Morhardt, J.E. 1986. Instream Flow Methodologies. Electric Power Research Institute Report, EPRI EA-4819. Palo Alto, California, EEUU.
- Nelson F. 1980. Evaluation of four Instream flow methods applied to four trout rivers in Southwest Montana. Draft Montana Dept. Fish Wildlife and Parks Report. Montana, EEUU.
- Orht, D.J. y Maughan, O.E. 1982. Evaluation of the Incremental methodology for recommending instream flows for fishes. *Transactions American Fisheries Society*, 111: pp. 413-445.
- Payne, T.R. 2003. The number of Transects Required to Compute a Robust PHABSIM Habitat Index. *International IFIM User's Workshop*, Colorado State Univ. Fort Collins, Colorado, EEUU.
- Payne T.R. y Diez Hernández, J.M. 2005. Actualización del Modelo RHABSIM 3.0 para estimación de caudales ecológicos. *Revista EIDENAR*, Vol. 111, 1 (3): pp. 12-17.
- Probst, W.E., Rabeni, C.F., Covington, W.G. y Marteney, R.E. 1984. Resource use by stream-dwelling rock bass and smallmouth bass. *Transactions of the American Fisheries Society*, 113: pp 283-294.
- Rantz, S.E. 1982. Measurement and computation of streamflow: Volume 1. Measurements of stage and discharge. *United States Geological Survey Water Supply Paper 2175 P*.
- Roussel, J. M. y Bardonnnet, A. 1997. Diel 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 Français de la Peche et de la Pisciculture* 346: pp. 573-588.
- Schlosser, I. J. 1982. Fish community structure and function along two habitat gradients in a headwater stream. *Ecological Monographs*, 52: pp. 395-414.
- Shirvell, C.S. 1986. Pitfalls of Physical Habitat Simulation in the Instream Flow Incremental Methodology. *Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences No.1460*.
- Simonson, T.D., Lyons, J. y Kanehl, P.D. 1994. Quantifying Fish Habitat in Streams: Transect Spacing, Sample Size, and a Proposed Framework. *North American Journal of Fisheries Management*, 14: pp. 607-614.
- Stalnaker, C.B., Lamb, B.L., Henrikson, J., Bovee, K.D. y Bartholow, J. 1995. *The Instream Flow Incremental Methodology. A Primer for IFIM*. National Biological Service. Washington D.C, EEUU.
- Trihey, E.W. y Wegner, D.L. 1981. Field data collection for use with the physical habitat simulation system of the instream flow group. USFWS, Washington D.C., EEUU.
- Waddle, T. (Ed). 2001. *PHABSIM for Windows: User's Manual and Exercises*. U.S. Geological Survey. Fort Collins, Colorado, EEUU.
- Waters, B.F. 1976. A methodology for evaluating the effects of different streamflows on salmonid habitat. En: *Proceedings of the Symposium and Specialty Conference on Instream Flow Needs*. Am. Fish. Soc. Bethesda, Maryland, EEUU. Vol. II pp. 334-343
- Wesche, T.A., Hasfurther, V.R., Hubert, W.A. y Skinner, Q.D. 1987. Assessment of flushing flow recommendations in a steep, rough regulated tributary. En: Craig, J.F. y Kemper, J.B. (Eds.): *Regulated Streams: Advances in Ecology*. Plenum Press. Nueva York y Londres (EEUU-UK)
- Wickett, W. P. 1958. Review of certain environmental factors affecting the production of pink and chum salmon. *J. Fish. Res. Board Can.*, 15: pp. 1103-1126.
- Zamora González, Hildier. 2005. El índice BMWP y la evaluación biológica de la calidad del agua en los ecosistemas acuáticos epicontinentales naturales de Colombia. *Memorias XL Congreso Nacional de Ciencias Biológicas*, Santiago de Cali. *Revista ACCB*, 2005. v.17. pp. 231 – 231.