

REVISIÓN DE LOS MODELOS ECO-HIDRÁULICOS UNI-DIMENSIONALES (1D) Y BI-DIMENSIONALES (2D) EN CORRIENTES FLUVIALES

Juan Manuel Díez Hernández & Liliana Burbano Burbano

Grupo de Hidráulica e Hidrología,

Universidad de Valladolid, España

Recibido para evaluación: 17 de Enero de 2007/ Aceptación: 11 de Mayo 2007 / Versión final: 23 de Mayo 2007

RESUMEN

La gestión hídrica ambiental promovida en los Planes de Ordenación de Cuencas en Colombia incorpora las necesidades del ecosistema fluvial, las cuales pueden analizarse satisfactoriamente con los modelos eco-hidráulicos. La metodología ecohidráulica más empleada en el ámbito mundial es la IFIM-PHABSIM, cuyo potencial en Colombia es prometedor. PHABSIM se fundamenta en los campos espacialmente distribuidos de las variables hidráulicas determinantes del hábitat acuático, que pueden modelarse con esquemas numéricos de dimensionalidad variable (1-2-3D), ligados a distintos niveles resolutivos del dominio. Este trabajo revisa las capacidades de las técnicas uni-dimensionales (1D) y bi-dimensionales promediadas en profundidad (2D), en términos hidráulicos y biológicos. El sistema hidrodinámico distribuido 2D es más exacto y explícito que la aproximación 1D, especialmente en los campos de velocidad. Sin embargo, la superioridad de las soluciones 2D debe ponderarse con su mayor exigencia de información hidrotopográfica y esfuerzo computacional. El progreso tecnológico promueve la utilización de modelos multidimensionales más fidedignos, pero actualmente la elección razonable del enfoque conveniente depende del tipo de análisis. Para las evaluaciones del hábitat en los estudios de caudales ecológicos, pueden obtenerse recomendaciones confiables mediante un protocolo 1D optimizado en su balance coste-precisión. Otros análisis del micro-hábitat más avanzados precisan los dominios explícitos 2D.

PALABRAS CLAVE: Ecohidráulica, Modelos 1D - 2D, IFIM, PHABSIM.

ABSTRACT

The environmental water management promoted by Watershed Planning Programs in Colombia incorporates the requirements of the fluvial ecosystem, which can be analyzed satisfactorily by echo-hydraulic models. The ecohydraulic methodology most applied in the world is the IFIM-PHABSIM, whose potential in Colombia is promising. PHABSIM is based on spatially distributed fields of hydraulic variables that determine the aquatic habitat, that are simulated by numerical schemes with variable dimensionality (1-2-3D) associated to different levels of domain resolution. This work reviews the capabilities of one-dimensional (1D) and bi-dimensional depth averaged models (2D), in terms of hydraulic and biological accuracy. The hydrodynamic distributed 2D system is more exact and explicit than the simplified 1D approach, specially in the velocity fields. However, the superiority of the 2D solutions should be weighted with their higher requirement of hydrotopographic information and computational effort. The technological progress promotes the use of multidimensional models, but the current reasonable election of the convenient procedure depends on a particular analysis. For the habitat assessment used in the instream flows setting, reliable recommendations can be obtained with a 1D protocol which is optimized in its cost-accuracy balance. Nevertheless, other more advanced micro-habitat analyses require the explicit 2D domains.

KEY WORDS: Ecohydraulics, 1D - 2D Models, IFIM, PHABSIM.

1. INTRODUCCIÓN. LOS NUEVOS DESAFÍOS DE LA DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS EN LA HIDRÁULICA ECOLÓGICA

La simulación de los campos hidráulicos en las corrientes naturales tiene una importancia creciente en muchas disciplinas. La modelación hidráulica es necesaria para la predicción confiable de avenidas, así como para el análisis y diseño de obras hidráulicas de diferentes tipologías. Adicionalmente, la comprensión correcta de las características del flujo resulta básica para el estudio de los procesos relacionados con el transporte de sedimentos, la calidad del agua y la protección del hábitat acuático.

Los enfoques para la modelación hidráulica fluvial pueden clasificarse en función del número de dimensiones espaciales con las que se conceptualiza y resuelve el flujo, como unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D). La capacidad analítica de estas técnicas es creciente con el número de dimensiones, habida cuenta del mayor rigor conceptual de sus formulaciones algebraicas más comprensivas, las cuales proporcionan unos dominios simulados más explícitos espacialmente. En consecuencia, los campos hidráulicos generados mediante las aproximaciones multidimensionales solventan las limitaciones de los modelos clásicos 1D, reproduciendo unos dominios de flujo espacialmente variado que pueden incorporar ambientes complejos con gradientes de velocidades marcados, flujos transversales o zonas de recirculación (Hardy y Addley, 2003).

El avance progresivo de la capacidad computacional ha posibilitado la aplicación de los enfoques anteriores de la Dinámica Computacional de Fluidos (DCF) en los análisis del hábitat fluvial y en los estudios de restauración fluvial. La nueva disciplina de la Hidráulica Fluvial denominada “Eco-hidráulica” estudia la relación entre los diversos componentes del ecosistema fluvial y las características del micro-entorno hidráulico en un tramo de río, mediante métodos de resolución variada. El núcleo operativo de la modelación ecohidráulica es la simulación hidráulica, que resuelve formulaciones con dimensionalidades simples o múltiples para predecir las profundidades, las velocidades y otras variables determinantes del hábitat acuático, en cada punto del sistema de representación espacial del cauce. Los campos simulados se vinculan adecuadamente con los criterios de idoneidad del hábitat para los organismos objetivo, con la finalidad de evaluar la calidad y cantidad

del micro-hábitat físico generado en cada elemento discretizador del dominio. Agregando los valores individuales de todos los elementos computacionales, se desarrollan las decisivas relaciones funcionales entre el Caudal y un Índice de Calidad del Hábitat acuático generado en el fragmento fluvial. La técnica ecohidráulica más aplicada en el ámbito mundial es la metodología IFIM, “Instream Flow Incremental Methodology” (Stalnaker et al., 1995), que incorpora el modelo conceptual PHABSIM “Physical Habitat Simulation System” (Bovee, 1982) para evaluar los efectos de eventuales alteraciones de las condiciones del flujo en una corriente sobre la disponibilidad de hábitat para la biocenosis acuática (p.ej. régimen de caudales, geometría, rugosidad, transporte sólido, físico-química, etc.).

Desde la perspectiva de una hidráulica numérica, la simulación de los factores abióticos que definen el hábitat fluvial representa un verdadero nuevo desafío, debido al incremento de precisión requerido para generar los resultados confiables a la escala de micro-hábitat que se interpretan en los estudios de restauración fluvial y de comportamiento de los organismos acuáticos. Las variables principales consideradas tradicionalmente para representar el hábitat acuático potencial son físicas (velocidad, profundidad) y morfológicas (composición del cauce). Sin embargo, existen otros factores que influyen en la calidad del ambiente hídrico, como son los gradientes hidráulicos, distancia al refugio, posibilidad de aislamiento, territorialidad y competencia, los cuales pueden ser investigados mediante modelos particularizados para los atributos físico-químicos que determinen o inhiban el potencial biogénico. Estas últimas variables también pueden modelar eficazmente mediante herramientas ingenieriles de la DCF conformadas por formulaciones de transporte-difusión-cinética.

Aunque las formulaciones matemáticas de las preferencias abióticas de los organismos acuáticos y de la disponibilidad de hábitat resultan simples en comparación con los sistemas algebraicos sofisticados que definen la dinámica del flujo, algunas hipótesis subyacentes limitan drásticamente la interpretación de los resultados. Por ello, la colaboración entre los ecólogos y los modeladores hidráulicos resulta absolutamente esencial para generar recomendaciones razonadas de confiabilidad evaluada. En este trabajo, se adopta una perspectiva general relacionada con los aspectos hidráulicos de la modelación del hábitat acuático, destacando las nuevas posibilidades que ofrece la DCF a los especialistas involucrados en la Hidráulica

Ambiental de ríos. Se describen los protocolos de caracterización fluvial y los métodos de simulación del hábitat empleados en los análisis ecohidráulicos PHABSIM 1D y 2D. Pretendemos esencialmente destacar las capacidades valiosas de estas herramientas para evaluar la oferta de hábitat acuático en los estudios de restauración fluvial y determinación de caudales ecológicos en los ríos de Colombia.

2. ENFOQUES ECOHIDRÁULICOS CLÁSICOS UNI-DIMENSIONALES (1D)

2.1. Sistema de Caracterización Fluvial 1D

Los modelos 1D y semi-2D que reúne el acreditado sistema PHABSIM de evaluación del hábitat (Bovee et al., 1997; Waddle, 2001) han sido, y todavía son, utilizados ampliamente en proyectos e investigaciones. En el ámbito Iberoamericano, PHABSIM se viene aplicando con éxito en España y Portugal desde hace dos décadas, en los estudios de rehabilitación de ríos con tipología variada (García de Jalón et al., 1987; Sanz Ronda et al., 2000; Diez Hernández y Olmeda Sanz, 2004). Su aplicación creciente en Latinoamérica parece resultar esperanzadora para investigar los ecosistemas tropicales de diversidad alta, como son las dos modelaciones reportadas en Colombia de ambientes hidrobiológicos

contrastados en los ríos Palacé - Cauca (Campo y Ruiz, 2001) y Magdalena - Bolívar (Diez Hernández, 2006a). El marco operativo PHABSIM maneja un sistema de representación del cauce conformado por un número limitado de puntos batimétricos, organizados espacialmente en varias secciones transversales representativas. Cada sección se considera compuesta de múltiples “celdas” rectangulares, centradas en las respectivas mediciones topográficas. La agregación global de estos elementos compone un esquema discretizador tridimensional estructurado, en forma de una malla de paralelepípedos representativa del dominio de hábitat modelable (Fig.1). En los ríos de gravas, generalmente se precisa un mínimo de secciones para capturar las diferentes unidades morfodinámicas presentes en un segmento fluvial (p.ej. rápidos, tablas y remansos). El trabajo de Simonson et al. (1994) propone una longitud mínima del tramo representativo para ríos relativamente pequeños, en función de su Anchura Media del Cauce (AMC): con dimensiones menores de 5 metros se recomienda levantar unas 13 secciones espaciadas el doble del AMC, y en álveos mayores (5-35m) unas 20 secciones espaciadas el triple del AMC. Por su parte, Elliot et al. (1996) y Payne (2003a) observan en ríos de gravas que los muestreos con menos de 15-20 secciones suelen acarrear incertidumbres e incorrecciones interpretativas notables, mientras que un esfuerzo de medición mayor supone un incremento de calidad

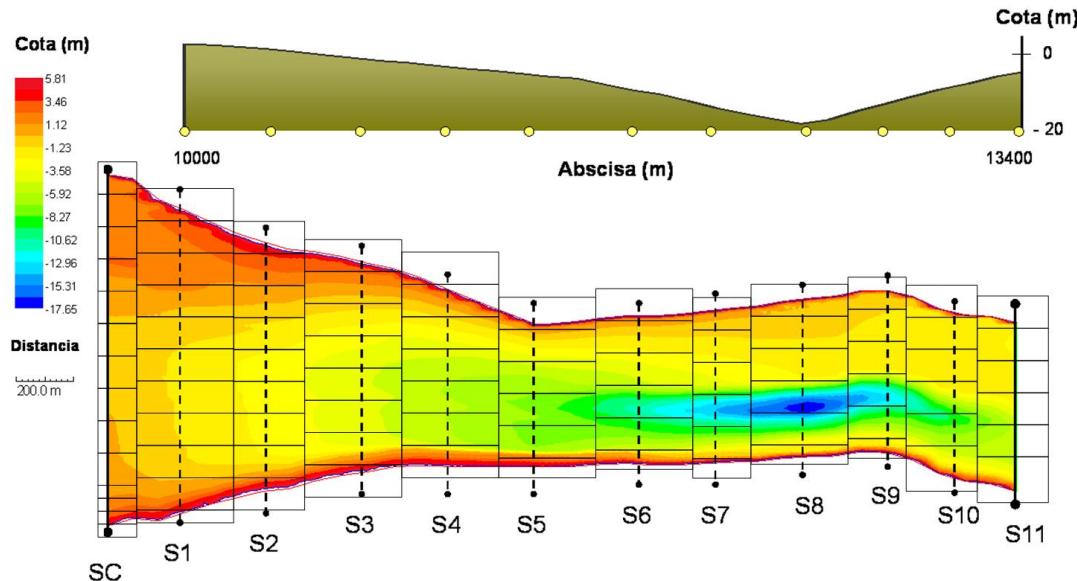


Figura 1. Esquema de representación del cauce utilizado en la modelación ecohidráulica 1D. La discretización del dominio acuático se desarrolla mediante una malla conformada por paralelepípedos (rectángulos en planta). El fragmento fluvial se representa mediante varias

hidráulica muy poco productivo en términos de evaluación del hábitat. En cualquier caso, el modelador determinará con juicio profesional el número de secciones apropiado para representar la variabilidad longitudinal y transversal del cauce suficientemente, dependiendo de los recursos disponibles y de la precisión requerida.

Para representar adecuadamente los campos de flujo de forma predictiva, es preciso registrar en cada sección transversal un número variable de: 1) Niveles de Superficie Libre (NSL), y 2) distribuciones horizontales completas de velocidades medias en los puntos batimétricos. Obviamente, cuantos más caudales se midan, más exacta resultará la predicción hidráulica, si bien no debe perderse de vista que el resultado finalmente interpretable en Ecohidráulica es un índice que evalúa la calidad del hábitat (pero no las velocidades ni profundidades). La información hidráulica de campo necesaria para los estudios PHABSIM ordinarios de caudales ecológicos ha sido investigada por Diez Hernández (2004, 2006b) en ambientes fluviales diversos, encontrando que el balance coste-confiabilidad optimizado corresponde a la calibración con tres NSL y una distribución de velocidades completa ligada al mayor caudal medible con seguridad.

2.2. Modelación Hidráulica 1D

El proceso estándar de PHABSIM 1D (Waddle, 2001) resuelve en cada sección transversal esquemas de solución simples para flujos permanentes uniformes o gradualmente variados, con objeto de predecir secuencialmente las profundidades y las velocidades medias en todas las celdas, asociadas a múltiples descargas dentro de un intervalo definido.

La profundidad en cada celda de una sección que origina un caudal simulado, deriva del respectivo NSL deducido de la curva de calibración particular. Para este procedimiento, PHABSIM reúne varios modelos de flujo semi-empíricos, los cuales consideran la variación de la rugosidad con el caudal inherente a las corrientes naturales de modo más o menos explícito: 1) ecuación de Manning para un régimen uniforme (MANSQ); 2) método del “paso estándar” para un régimen gradualmente variado (WSP); 3) ajuste de regresión de mínimos cuadrados entre el NSL y el Caudal (STGQ); o bien el 4) empleo de soluciones externas (p.ej. HEC-RAS). El modelo MANSQ resuelve el flujo permanente

uniforme en cada sección de modo independiente, aplicando una expresión conjunta de las ecuaciones de continuidad y de Manning (Ecuación 1):

$$Q = \frac{\sqrt{S}}{n} R h^{\frac{2}{3}} A \quad (1)$$

donde Q es el caudal, S la pendiente hidráulica, n el coeficiente de rugosidad de Manning, Rh el radio hidráulico y A el área mojada. La particularización de MANSQ para las secciones compuestas de múltiples celdas (i) incorpora una agregación de las conductividades de todas ellas, mediante sus respectivas áreas mojadas A_i y radios hidráulicos Rh_i (Ecuación 2).

$$Q = \frac{\sqrt{S}}{n} \left(\frac{\sum A_i \cdot Rh_i}{A} \right)^{\frac{3}{2}} A \quad (2)$$

El patrón de variación de la rugosidad con el caudal se deduce a partir de las mediciones de campo disponibles (NSL-Caudal). El método engloba las resistencias hidráulicas debidas a la rugosidad (n) y a la pendiente (S) en el Factor de Transporte (FT) (Ecuación 3).

$$FT = \frac{Q}{R h^{\frac{2}{3}} A} \quad (3)$$

Primeramente, se selecciona un Caudal de Calibración (Q^{cal}) y se deduce su respectivo Factor de Transporte de Calibración (FT^{cal}). El ajuste $Q-FT$ propuesto está anclado en dicho caudal, y se configura mediante un coeficiente β que minimiza las discrepancias entre los FT predichos (FT^{sim}) y los deducidos de las mediciones (Ecuación 4).

$$FT^{sim} = FT^{cal} \left(\frac{Q^{sim}}{Q^{cal}} \right)^{\beta} \quad (4)$$

Con mayor rigor conceptual, el modelo WSP (“Water Surface Profile”) aplica el conocido método del paso estándar para secciones compuestas (Henderson, 1966), en un tramo formado por secciones consecutivas con régimen subcrítico. La Ecuación de Conservación de la Energía (ECE) se resuelve con un coeficiente de Coriolis α que no es necesariamente nulo en los cauces compuestos de varias celdas (i) que se conciben en ecohidráulica (Ecuación 5).

$$\alpha = \frac{\sum A_i \cdot Rh_i^2}{A \cdot Rh} \quad (5)$$

La calibración de WSP consta de dos fases. En la primera se determinan los coeficientes de rugosidad de las secciones (n^{cal}). Habitualmente, se deducen a partir del perfil hidráulico correspondiente al caudal observado mayor, resolviendo la ECE con la rugosidad como incógnita. La variación conjunta de la rugosidad del tramo con los caudales simulados (n^{sim}) se reproduce mediante el Modificador de Rugosidad (MODR), que adapta los coeficientes de Manning de todas las secciones en la misma proporción ($n^{sim} = MODR \cdot n^{cal}$). Por lo tanto, el calibrador debe obtener algún tipo de ajuste entre el MODR y el Caudal, que minimice las diferencias entre los perfiles hidráulicos observados y los simulados.

El modelado de las velocidades medias presupone un flujo 1D estricto en cada una de las celdas, que se resuelve mediante una expresión conjunta simplificada de las ecuaciones de Manning (equiparando el radio hidráulico a la profundidad) y de continuidad (Ecuación 6):

$$Q = \sum \left(\frac{\sqrt{S}}{n_i} y_i^2 A_i \right) \quad (6)$$

donde Q es el caudal total de la sección, resultado de sumar las contribuciones de todas las celdas. La pendiente hidráulica de la sección S se presupone idéntica a la de todas las celdas (flujo 1D). Para una descarga determinada, cada celda (i) lleva asociada su respectiva rugosidad n_i , profundidad y_i , y área mojada A_i . La calibración consiste en deducir un coeficiente de Manning para cada celda, a partir de una de las distribuciones de velocidad registradas. La experiencia demuestra que los mejores resultados globales se logran con la distribución correspondiente al caudal mayor (Payne, 2003b; Diez Hernández, 2006b). Estas rugosidades calculadas se consideran invariables durante la resolución de otras descargas, dejando que el balance de masas produzca unas velocidades ajustadas que sean coherentes con el régimen permanente. El número limitado de los procesos incorporados en estos métodos (básicamente la gravedad-pendiente y la resistencia hidráulica del lecho) restringe el rango de simulación a uno próximo al abarcado en la caracterización: del 40% del caudal observado menor al 250% del caudal mayor (Bovee y Milhous, 1978).

En conclusión, la simulación hidráulica PHABSIM 1D de un tramo incluye: 1) los perfiles hidráulicos, que determinan los campos de profundidad; y 2) las distribuciones horizontales de velocidad en cada sección,

que forman los campos de velocidad (Figura 2). Los errores referenciales de la predicción de NSL en ambientes ecohidráulicos diversos, cuando se calibra con al menos tres observaciones de campo, suelen ser menores del 3% y oscilan entre los 5 mm y 20 mm (Waddle, 2001, Diez Hernández, 2004). El desatino en la simulación de velocidades suele ser menor del 19% y en torno a los 4 cm/s (Diez Hernández, 2004; 2005). A pesar del perfeccionamiento de las técnicas hidráulicas 1D (Diez Hernández y Martínez de Azagra, 2005) y de la optimización del protocolo de caracterización fluvial (Sanz Ronda, 2004), la limitada representatividad de la variabilidad longitudinal del cauce y la difícil calibración de las orillas confiere a estos esquemas una predictibilidad reducida en geometrías irregulares y discontinuas (Ghanem et al., 1995; Secretan et al., 2001).

2.3. Sistema PHABSIM de Evaluación del Hábitat Acuático

El constituyente biológico del modelado ecohidráulico reside en las Curvas de Preferencia, las cuales reproducen el grado de adecuación de un organismo a las variables que determinan su hábitat físico utilizable, evaluado mediante un coeficiente que varía de cero a uno (Figura 3). Normalmente, se utilizan las curvas de la ictiofauna indicadora del estado ecológico, aunque también existen de otros organismos (macroinvertebrados, insectos, reptiles, aves, etc.) e incluso de actividades acuáticas (pesca, canotaje, etc.). Las tres variables abióticas clave son la velocidad, la profundidad y el tipo de material del lecho (Bovee, 1982): la velocidad determina la bioenergética de los individuos mediante la alimentación y desplazamiento; la profundidad interviene en los procesos de penetración lumínica y eventualmente en la predación; el lecho condiciona la oferta de refugio, la productividad de invertebrados y la calidad de los frezaderos (Leclerc, 2004). Otras variables menos comunes que pueden jugar un papel importante son la temperatura (Bartholow, 2002), luminosidad (Bechara et al., 2003), turbidez, y contenido orgánico de los sedimentos (Morin et al., 2003).

El estudio de los ecosistemas fluviales que tienen una estructura relativamente simple se puede acometer con unas pocas curvas de preferencia pertenecientes a los organismos objetivo. Sin embargo, en las comunidades diversas deben encontrarse unos caudales que equilibren las necesidades de todas las especies, lo cual precisa el

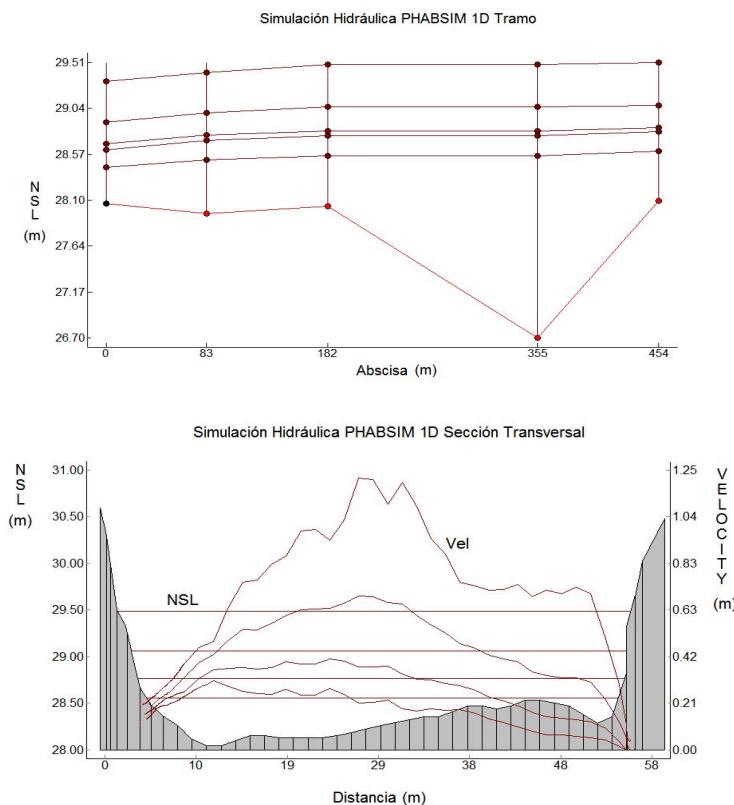


Figura 2. Solución de varios caudales mediante el esquema ecohidráulico PHABSIM 1D: (arriba) perfiles hidráulicos en un fragmento fluvial representado mediante 5 secciones transversales; (abajo) predicciones en una sección de los Niveles de Superficie Libre (NSL) y de las distribuciones horizontales de velocidad asociadas (Vel).

escrutinio de funciones de preferencia adicionales. En esos casos, resultan prácticas las curvas de “gremios” (Lamouroux y Sounchon, 2002), que agregan las idoneidades para varios organismos con requerimientos de hábitat comunes determinados por unas estrategias reproductivas o alimenticias similares.

La evaluación del hábitat acuático se realiza combinando adecuadamente los campos simulados de profundidad y velocidad con las curvas de preferencia de la/s especie/s objetivo, para desarrollar las decisivas relaciones funcionales entre el Caudal (Q) y un Índice de Hábitat (IH) que expresa la calidad y cantidad del micro-hábitat generado (Waddle, 2001). Primeramente, se calcula el

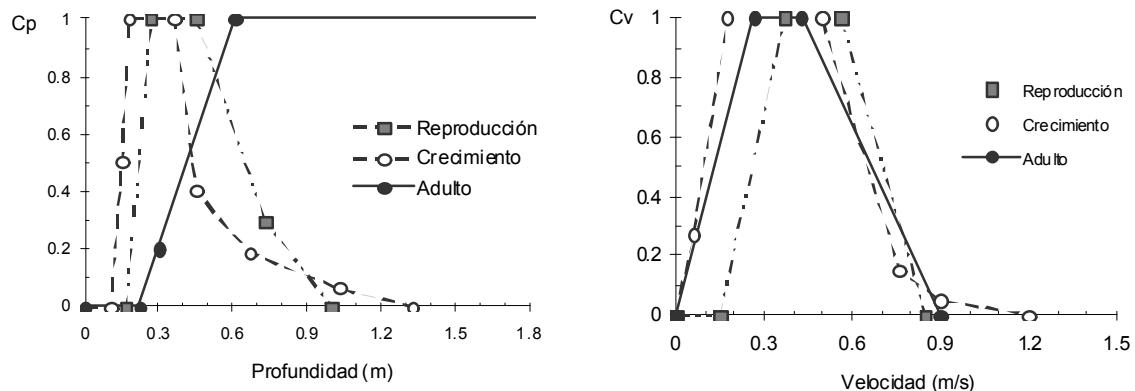


Figura 3. Curvas de preferencia univariadas para tres estadios vitales de la trucha arco iris (*Onchorynchus mykiss*) elaboradas originalmente por Bovee (1986). En ordenadas representan la idoneidad de una celda en función de la profundidad (izqda) y la velocidad media (dcha).

Coeficiente de Conformidad de cada elemento discretizador (C_i) para un caudal y la preferencia de un organismo, agregando multiplicativamente los coeficientes correspondientes a las variables estudiadas (p.ej. v =velocidad, p =profundidad, l =material lecho): $C_i = C_{Vi} \cdot C_{Pi} \cdot C_{Ii}$). La distribución espacial de idoneidades resultante posibilita identificar el microambiente idóneo para un organismo durante una descarga determinada, valorado de cero a uno (Figura 4). Esta herramienta gráfica resulta práctica para evaluar los efectos sobre el ecosistema fluvial ligados a modificaciones del cauce y/o del régimen de caudales, así como a otros escenarios hidrológicos. También puede determinar la eficacia de las medidas de mejora del hábitat fluvial (refugios artificiales, deflectores, etc) y de restauración de riberas (revestimientos “verdes”, plantaciones, etc).

El potencial biogénico del tramo para un organismo durante un evento de flujo se cuantifica mediante el Índice de Hábitat (IH), integrando las idoneidades de todas las celdas mojadas (C_j), ponderadas por su área respectiva (A_j): $IH = S(C_j \cdot A_j)$. Repitiendo este proceso para todos los flujos analizables (Q) y criterios de preferencia estipulados, se desarrollan las decisivas relaciones Q-IH de un estudio PHABSIM, las cuales manifiestan el rango de caudales idóneo para cada organismo (Figura 5). Del

escrutinio de este tipo de funciones se determinan actualmente los caudales ecológicos confiables para la planificación hídrica avanzada en muchos países, y podría hacerse también en Colombia.

3. MODELACIÓN BI-DIMENSIONAL (2D) DE FACTORES ABIÓTICOS

El desarrollo rápido de la Dinámica Computacional de Fluidos (DCF) ha posibilitado la resolución de flujos a lámina libre con un grado de resolución progresivo, mediante esquemas numéricos hidrodinámicos procesados con computadores de potencia creciente. Las herramientas de simulación cinemática 2D se han popularizado durante la última década, gracias a su descripción mejorada de los fenómenos hidráulicos complejos, especialmente en áreas de velocidad elevada, regímenes rápidamente variados y zonas de reflujo (Katopodis, 2003; Hardy y Addley, 2003; Secretan et al., 2001). El sistema de algoritmos 2D promediado en profundidad (“depth averaged”) proporciona unos dominios simulados más acertados en el plano horizontal que los 1D, describiendo convenientemente el movimiento alrededor de islas y obstrucciones, en zonas de reflujo y en cauces anastomosados. Si bien estas soluciones resultan imprecisas en ambientes hidráulicos donde la componente vertical de la velocidad es

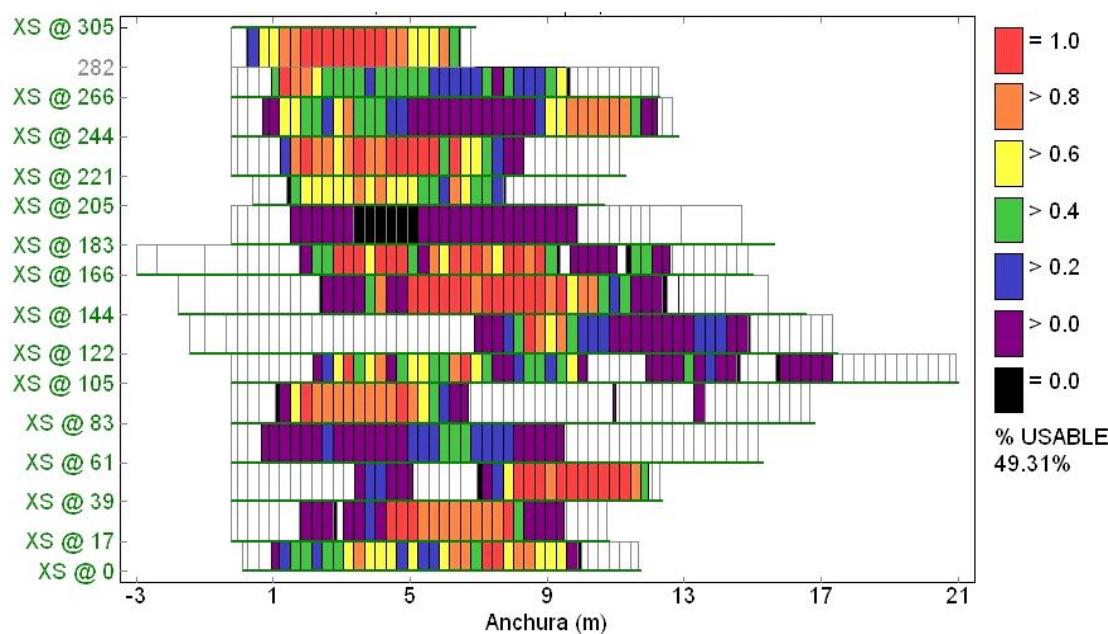


Figura 4. Simulación ecohidráulica PHABSIM 1D de un fragmento fluvial, espacialmente distribuida en celdas rectangulares. Las idoneidades evaluadas en cada elemento para un caudal y una preferencia determinada, se codifican en colores (rango de 0 a 1). Ejecutada con el software RHABSIM 3.0 en español (Payne y Diez Hernández, 2004).

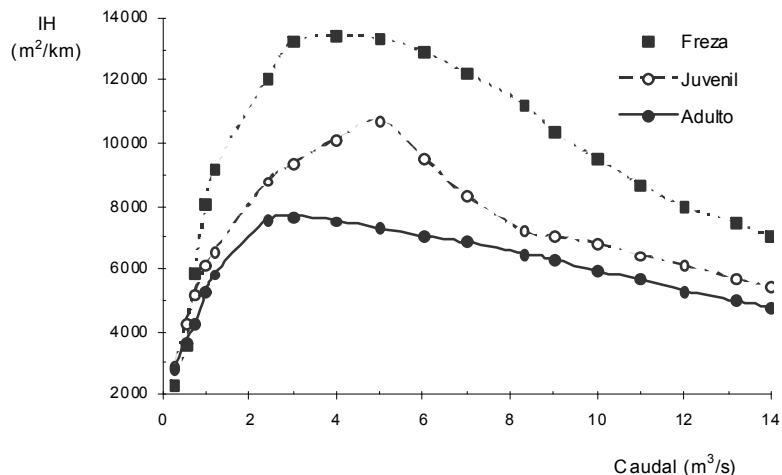


Figura 5. Relaciones funcionales entre el Caudal y el Indice de Hábitat (IH) de un tramo fluvial para tres estadios vitales de un pez objetivo. El hábitat acuático (IH) se expresa como superficie utilizable acumulada por km de río

importante (p.ej. vórtices en meandros, flujo alrededor de grandes bloques), está demostrada su aptitud para evaluar el hábitat fluvial en cauces de diferentes morfologías (Ghanem et al., 1995; Waddle, 1998).

Los modelos distribuidos 2D transforman la realidad física en una formulación matemática basada en las ecuaciones de Saint-Venant, expresadas de forma conservativa en las direcciones longitudinal (x) y transversal (y). El sistema cuasi-lineal de Ecuaciones Diferenciales Parciales (EDP) que representan la conservación de la masa (Ecuación 7) y de las dos componentes del vector momento (Ecuaciones 8 y 9) se resuelve mediante diferentes métodos numéricos, que proporcionan la profundidad y las dos intensidades de flujo (x-y) en cada uno de los elementos de la malla representativa del dominio.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

Donde x e y son las coordenadas cartesianas en el plano horizontal y t es el tiempo. Las variables dependientes H , q_x y q_y son funciones de las variables independientes t , x e y , las cuales representan valores puntuales. El término H expresa la profundidad, mientras que q_x y q_y son las componentes del caudal unitario en anchura en las dos direcciones. Las componentes de la velocidad promediada en profundidad U y V se relacionan con los caudales unitarios mediante las fórmulas: $U = q_x / H$ y $V = q_y / H$. La gravedad g y la densidad ρ también intervienen. En las ecuaciones, S_{ox} y S_{oy} son las componentes de la pendiente del cauce. Las pendientes

de fricción en las dos direcciones son S_{fx} y S_{fy} . Los componentes del tensor de esfuerzo turbulento horizontal son τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yx} y τ_{yy} .

Los esquemas discretizadores de diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos son conceptualmente distintos, pero comparten la finalidad de representar numéricamente tanto la morfología del cauce como la estructura matemática del flujo. La secuencia resolutiva de las EDP contiene las dos fases que se describen a continuación, con la finalidad de transformar la representación matemática del flujo en unos algoritmos informatizables que conciben el espacio modelable compuesto de un número finito de puntos.

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uq_x) + \frac{\partial}{\partial y}(Vq_x) + \frac{g}{2} \frac{\partial}{\partial x} H^2 = gH(S_{ox} - S_{fx}) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x}(H\tau_{xx}) \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial y}(H\tau_{xy}) \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uq_y) + \frac{\partial}{\partial y}(Vq_y) + \frac{g}{2} \frac{\partial}{\partial y} H^2 = gH(S_{oy} - S_{fy}) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x}(H\tau_{yx}) \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial y}(H\tau_{yy}) \right) \quad (9)$$

3.1. Discretización 2D del Dominio Fluvial

Se trata en esencia de una simplificación del dominio espacial y temporal continuo e infinito a un sistema discreto y finito, el cual es resoluble computerizadamente. El espacio se divide en una malla compuesta de celdas

unidas en los nodos topográficos, que constituye el sistema de caracterización batimétrica (Figura 6). La tipología de las mallas es variada, dependiendo de la forma de sus elementos (triangular-cuadrangular), del ángulo formado entre ellos (ortogonal-oblicua), y de la curvatura determinada por el sistema de coordenadas (si-no estructurada).

El aspecto no estructurado de la malla empleada en el esquema de resolución numérica de elementos finitos acredita una mayor flexibilidad geométrica, que resulta ventajosa para las topografías complejas y estudios morfológicos detallados (Ghanem et al., 1995). El dominio temporal se divide en intervalos concretos.

La discretización del Modelo Digital del Terreno (MDT) más habitual en PHABSIM (Ghanem et al., 1995) utiliza una Malla Irregular Triangular (MIT) no-estructurada y no-ortogonal, delineada con la rutina optimizadora de Delauney. La distribución refinada de los nodos se consigue integrando las líneas de rotura, las cuales se definen mediante una triangulación (método de bisección de segmento) complementada con un suavizado de efecto topográfico. La calidad de la malla resultante puede evaluarse mediante índices de calidad.

3.2. Discretización de las Ecuaciones Diferenciales Parciales (EDP)

Las infinitas EDP que rigen el flujo con infinitas incógnitas se reducen a un número finito de ecuaciones resolubles en un número finito de puntos en el espacio y en el tiempo. El cálculo se limita a un conjunto de ecuaciones algebraicas no simétricas y no lineares para todas las velocidades y profundidades desconocidas. Existen dos métodos de solución: 1) los explícitos, que calculan las variables de un nodo en un instante a partir de los valores en los nodos circundantes en el momento anterior; y los 2) implícitos, que determinan las variables de un nodo en un instante, integrando lo sucedido en los elementos vecinos en ese mismo instante y también en el previo. En cualquier caso, una clave del modelado computacional es lograr un esquema de discretización equilibrado que ofrezca una solución confiable.

El sistema hidrodinámico 2D espacialmente explícito más empleado en Ecohidráulica está promediado en profundidad, con las siguientes particularidades (Ghanem et al., 1995): 1) distribución vertical de presiones hidrostática; 2) distribución vertical de velocidades constante; 3) flujo 1D estricto en las secciones de control;

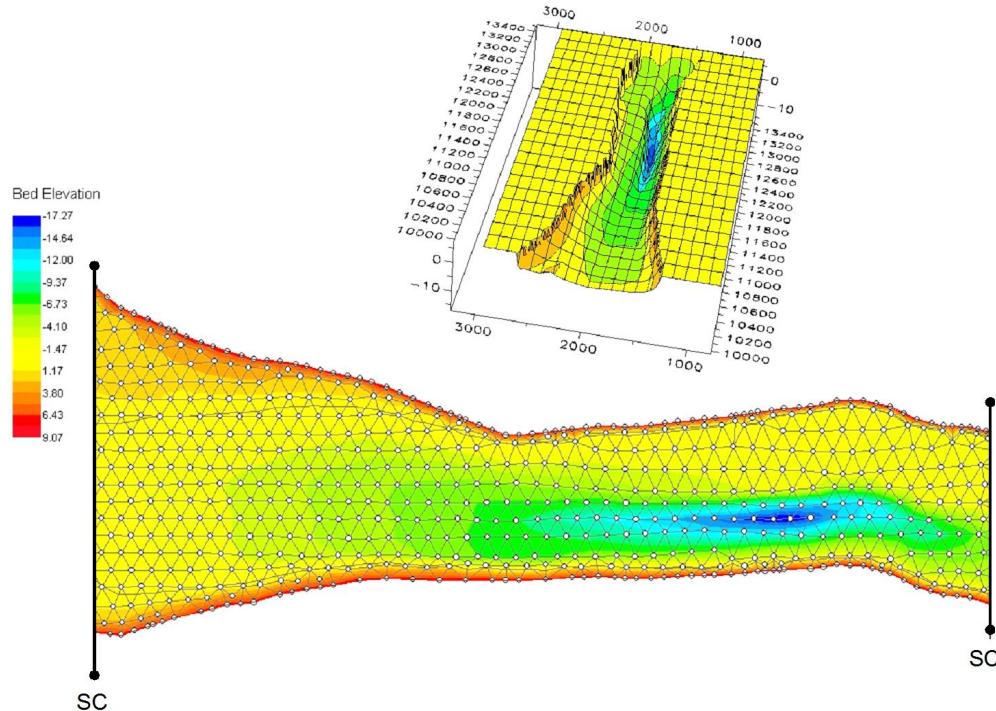


Figura 6. Esquema de un sistema de representación del cauce muy utilizado en el modelado ecohidráulico 2D promediado en profundidad. Esta discretización del dominio espacial se desarrolla mediante una Malla Irregular Triangular (MIT), ligada a un esquema de resolución numérica de elementos finitos.

y 4) efecto inapreciable de las fuerzas de Coriolis y del viento. La formulación matemática aplicable en cada celda computacional reduce y simplifica el sistema de ecuaciones de Saint-Venant para un régimen permanente a tres expresiones: conservación de masa, y conservación de los momentos en las direcciones longitudinal y transversal (Ecuaciones 7, 8 y 9). En consecuencia, las variables a resolver en cada nodo son la profundidad y las intensidades del flujo en ambas direcciones. La resistencia hidráulica de fricción se incorpora mediante la forma 2D de la ecuación de Manning (Ecuaciones 10 y 11):

$$S_{\hat{x}} = \frac{U\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 g H} \quad (10)$$

$$S_{\hat{y}} = \frac{V\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 g H} \quad (11)$$

Donde C es el coeficiente de Chézy, relacionado con la rugosidad efectiva del contorno k y la profundidad H mediante la Ecuación 12 (Van Rijn, 1990; Ghanem et al., 1995):

$$C = 5.75 \log \left(12 \frac{H}{k} \right) \quad (12)$$

Los esfuerzos cortantes promediados en profundidad originados por la turbulencia se representan por τ_{xy} , τ_{yx} , τ_{yy} y τ_{yy} . De los diversos modelos de turbulencia existentes (Rodi, 1984; ASCE, 1988) se suele aplicar el clásico de Boussinesq (Ecuación 13), con una viscosidad turbulenta ν calculada mediante tres coeficientes ajustables (Ecuación 14): la difusión de la onda (ε_x), el esfuerzo cortante longitudinal (ε_y) y el gradiente vertical de velocidades (ε_z).

$$\tau_{xy} = \nu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (13)$$

$$\nu = \varepsilon_x \frac{H\sqrt{u^2 + v^2}}{C} + \varepsilon_y + \varepsilon_z H^2 \sqrt{2 \frac{\partial u}{\partial y} + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \frac{\partial v}{\partial y}} \quad (14)$$

A efectos prácticos, generalmente se presupone una turbulencia isotrópica estricta $\nu_{xx} = \nu_{yy} = \nu_{zz} = \nu$, con objeto de estabilizar el proceso de resolución numérica, si bien podrían incorporarse otros enfoques más sofisticados con relativa facilidad.

Existen diversos procedimientos de resolución de los sistemas de EDP en los elementos discretos del cauce, aunque el más popular e informatizado para PHABSIM

es el método numérico de elementos finitos informatizado R2D (Ghanem et al., 1995). Esta herramienta implementa el sistema implícito de cálculo simultáneo iterativo de Newton-Raphson, con un esquema de Residuos Ponderados modificado con la técnica SUPG ("Streamline Upwind Petrov-Garlekin"). Su solucionador de iteración ("solver") aplica el método GMRES ("Generalized Minimal Residual Method"; Saad y Schultz, 1986) con los valores fijados del coeficiente de Petrov-Garlekin y los coeficientes de viscosidad.

La calibración del modelo 2D comienza con la caracterización de la distribución espacial de la rugosidad en el dominio, atendiendo al tamaño de los materiales y las formas del lecho. Seguidamente, se realizan aproximaciones sucesivas para encontrar un factor global de escala que minimice las discrepancias entre las predicciones y las observaciones de los perfiles hidráulicos y de las velocidades puntuales, de modo coherente con los errores del levantamiento hidrotopográfico. Finalmente, combinando las modelaciones del micro-ambiente hidráulico con las curvas de preferencia, se generan las soluciones espacialmente explícitas del micro-hábitat acuático evaluado mediante un Índice de Hábitat (Figura 7).

La potencia resolutiva de esta concepción multidimensional esta posibilitando abordar unos análisis ecohidráulicos sofisticados, como la fragmentación del hábitat fluvial, bioenergética de los peces y optimización de las obras de restauración fluvial.

4. REVISIÓN COMPARATIVA DE LA ECOHIDRÁULICA 1D Y 2D

Las capacidades predictivas de los enfoques 1D y 2D provienen de los dos niveles de aproximación inherentes a la modelación matemática computacional: 1) la abstracción de la realidad física a una formulación matemática concreta, y la 2) transformación de las ecuaciones matemáticas en aritmética computacional. Los modelos ecohidráulicos 1D precisan una información hidrotopográfica relativamente limitada, para resolver unas formulaciones físicas simples mediante procedimientos rápidos, sencillos y poco exigentes en cuanto a los recursos informáticos y los conocimientos técnicos. El dominio del hábitat unidimensional proporcionan una resolución transversal interesante, pero su limitada representatividad longitudinal restringe

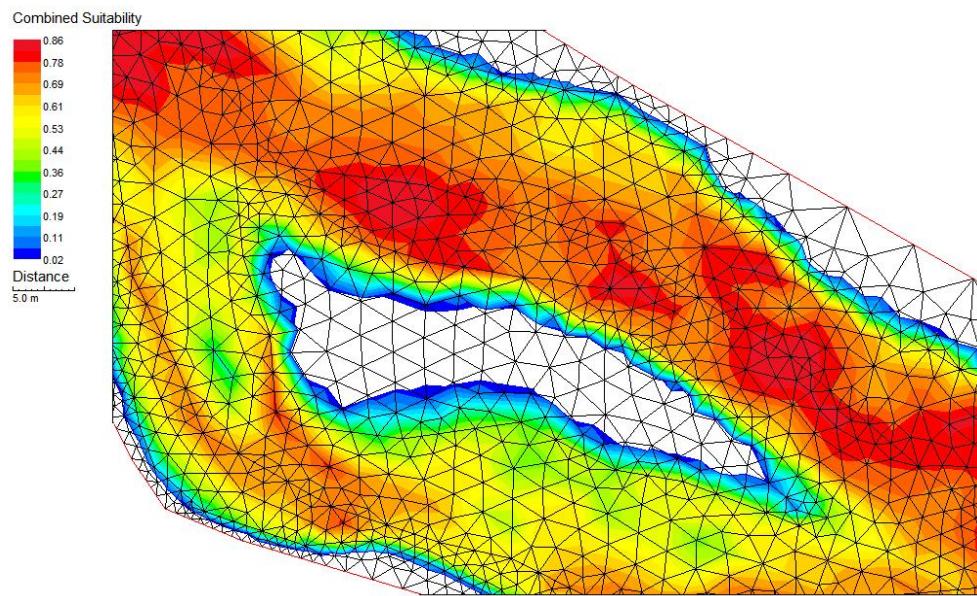


Figura 7. Fragmento de una simulación hidrodinámica PHABSIM 2D promediada en profundidad con el esquema computacional de R2D (Ghanem et al., 1995). Las condiciones micro-hidráulicas alrededor de la isla generan un campo explícito de idoneidades del hábitat codificadas en colores. La resolución alta y flexible de la MIT multidimensional facilita un diagnóstico ecohidráulico detallado.

el tipo de análisis abordable (p.ej. fragmentación de hábitat). Adicionalmente, los campos de velocidad 1D incluyen unos desatinos mejorables, que están determinados por los esquemas de simplificación del cauce y de los modelos de turbulencia. Los sofisticados esquemas analíticos 2D son mucho más exigentes en cuanto a los datos de entrada, la preparación del modelador y los recursos computacionales. Sin embargo, las ventajas de la solución hidrodinámica son evidentes, habida cuenta de su mayor capacidad para unos generar unos dominios de microhábitat con mayor resolución espacial y unos campos de velocidad más exactos (comparar Figuras 4 y 7).

Los errores ligados a la simulación de los NSL que se han reportado en entornos fluviales de tipología variada son bajos: normalmente menores del 3% con los métodos 1D (Waddle, 2001; Diez Hernández, 2005) y en torno al 2% con las soluciones cinemáticas 2D (Boudreau et al., 1996; Sanz Ronda, 2004). En cualquier caso, la valoración prudente de esta mejora en la exactitud debe considerar las imprecisiones ligadas a la medición hidrotopográfica con una tecnología particular. Cabe destacar que la calibración de los algoritmos 1D es notablemente más sencilla que la de las intrincadas soluciones multidimensionales, puesto que el ajuste del modelo de NSL es independiente al del esquema de velocidades. Por

el contrario, la configuración de los parámetros de los modelos 2D influye conjuntamente en la resolución simultánea de los campos de profundidad y de velocidad.

La mayor ventaja en términos hidráulicos de la interpretación 2D reside en la confiabilidad alta de sus campos hidrodinámicos de velocidad, cuyos errores relativos son menores del 10% normalmente (Leclerc et al., 1995; Boudreau et al., 1996; Sanz Ronda, 2004). El mejor desempeño del esquema 2D se debe a su simplificación topográfica perfeccionada del dominio fluvial, así como al mayor rigor conceptual de sus formulaciones físicas (resistencia hidráulica y turbulencia).

En cualquier caso, la fiabilidad del micro-ambiente hidráulico 2D promediado en profundidad es mejorable, utilizando unos procedimientos de solución más comprensivos en cuanto a las hipótesis de cálculo y la formulación del mecanismo de turbulencia. La premisa básica de una distribución vertical de presiones de tipo hidrostática incorpora incertidumbre en pendientes mayores del 10%, así como en lechos con formas de dimensión horizontal menores de diez veces la profundidad (Steffler y Blackburn, 2002). La presuposición de una distribución vertical de velocidades constante impide resolver los flujos verticales y vórtices, dificultando la estimación consistente del micro-hábitat

en zonas de interés biológico (cerca del lecho, detrás del los bloques, etc). Además, no resuelve el problema de la alta sensibilidad de los modelos determinísticos a la rugosidad del cauce, la cual es especialmente crítica durante caudales reducidos (Leclerc et al., 1995; Parasiewicz, 2001). De hecho, varios investigadores detectan modelaciones inseguras en arroyos con pendientes mayores del 1% (Tarbet y Hardy, 1996; Lamoroux, 1999) y geometrías muy irregulares, donde se originan fenómenos locales poco predecibles durante regímenes supercríticos (Beebe, 1996). En una corriente de esas características, Guay et al. (2001) obtienen un ajuste entre las velocidades observadas y las predichas con 2D muy pobre ($r^2=0.17$; 492 puntos). Las consideraciones precedentes indican que la capacidad actual de los modelos 2D se aprovecha de mejor modo en las corrientes de dimensiones medianas a grandes.

Las discrepancias en el ámbito hidro-ecológico entre las predicciones del Índice de Hábitat agregado para un río con técnicas 1D y 2D son generalmente muy reducidas y menores del 10% (Waddle, 2000). La experiencia investigadora durante la última década evidencia que la hidrodinámica multidimensional mejora la resolución espacial y la predictibilidad de las clásicas ecuaciones unidimensionales. Sin embargo, la valoración responsable del avance 2D debe incorporar las exigencias y los costos asociados al mayor esfuerzo de captura de datos de campo y de resolución computerizada de un caso particular. La práctica habitual de caracterización fluvial en los estudios PHABSIM 1D consiste en levantar unas cuantas secciones transversales representativas de los distintos hábitats identificados en el tramo. Sin embargo, el procedimiento 2D precisa una batimetría detallada mucho más completa. La calibración hidráulica en ambos casos engloba la deducción de unas rugosidades efectivas, la determinación de un patrón de variación de la rugosidad con el caudal, y la configuración de los modelos. El protocolo 1D utiliza típicamente mediciones de un mínimo de tres NSL y una distribución horizontal completa de velocidades (asociada al mayor caudal medible con seguridad). Sin embargo, el esquema 2D precisa los registros durante varios caudales del perfil hidráulico y las velocidades en múltiples nodos de control distribuidos por el dominio. En ocasiones, la información de campo disponible es menor, lo cual incorpora incertidumbre y menoscaba la confiabilidad.

A nuestro juicio, la aproximación ecohidráulica 1D resulta suficiente para los estudios PHABSIM normales de caudales ecológicos. Para esta finalidad, existen

protocolos para generar resultados defendibles con un balance optimizado entre la exactitud y el coste (Payne, 2003b; Diez Hernández, 2006b). Sin embargo, para otras aplicaciones más detalladas, como por ejemplo el diseño de estructuras de mejora del hábitat fluvial (deflectores, refugios, etc.), los modelos distribuidos 2D ofrecen la flexibilidad necesaria para una evaluación sólida.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las técnicas ecohidráulicas poseen una capacidad interesante para generar los campos de las variables hidráulicas y biológicas que determinan la oferta de hábitat acuático físico para la biocenosis fluvial. El sistema analítico PHABSIM constituye una herramienta provechosa para el ordenamiento y manejo ambiental del recurso hídrico, facilitando el diseño técnico de actuaciones de conservación y restauración fluvial.

Las predicciones hidráulicas de los esquemas clásicos 1D son mejorables, pero resultan suficientemente atinadas para los estudios convencionales PHABSIM de caudales ecológicos. Los modelos hidrodinámicos 2D poseen una capacidad mayor para describir las condiciones del microhábitat acuático, puesto que producen los campos espacialmente explícitos de alta resolución que se escrutan en las evaluaciones ecohidráulicas avanzadas. El progreso veloz de la tecnología telemétrica y de la capacidad computacional está promoviendo el empleo de soluciones ecohidráulicas 2D y 3D, las cuales permiten aproximaciones crecientes a la percepción real de la corriente que tienen los organismos acuáticos.

Los resultados PHABSIM están determinados por los criterios de idoneidad seleccionados. En situaciones con información escasa o confusa sobre la ecología de las especies objetivo, la lógica difusa ha demostrado unas posibilidades interesantes (Jorde et al., 2001; Scheneider y Jorde, 2003). Adicionalmente, los ecosistemas fluviales complejos pueden simplificarse mediante unas curvas gremiales, que agrupan los modelos de preferencia de varias especies con exigencias de hábitat similares. Estos dos aspectos del constituyente biológico de PHABSIM suscitan investigaciones interesantes para los ríos de Colombia.

La Hidráulica Ecológica ofrece unas herramientas potentes para incorporar convenientemente los requerimientos biológicos del ecosistema acuático en los estudios fluviales. La Ecohidráulica aparece en Colombia como un campo de investigación que debe fomentarse, puesto que proporciona soluciones racionales para

salvaguardar la destacada biodiversidad de sus ecosistemas acuáticos.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI), mediante una beca Postdoctoral.

REFERENCIAS

- ASCE Task Committee on Turbulence Models in Hydraulic Computations. 1988. Turbulence modelling of surface water flow and transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114 (9).
- Bartholow, J. M. 2002. Modeling Uncertainty: Quicksand for Water Temperature Modeling. Conference on Hydrologyc Extremes, American Institute of Hydrology. 13-17/10/02. Portland, Oregon.
- Beebe, J.T. 1996. Fluid speed variability and the importance to managing fish habitat in rivers. *Regulated Rivers: Research and Management*, 12: pp 63-79.
- Bechara, J., Morin, J. y Bodreau, P. 2003. Évolution récente de l'habitat du doré jaune, de la perchaude, du grand brochet et de l'achigan à petite bouche au lac Saint-Francois, fleuve Saint-Laurentz. R640, INRS-Eau, Terre & Environnement. 74P.
- Boudreau, P., Bourgeois, G., Leclerc, M., Boudreault, A. y Belzile, L. 1996. Two-dimensional habitat model validation based on spatial fish distribution: Application to juvenile atlantic salmon of Moisie River. pp B365-B380.
- Bovee, K. D. 1982. A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology. Instream Flow Information Paper No. 12. USFWS, FWS/OBS-82/26. Fort Collins, Colorado. 248 P.
- 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, Colorado. 312P.
- Bovee, K.D. y Milhous, R. T. 1978. Hydraulic simulation in instream flow studies: theory and techniques. Instream Flow Information Paper No. 5. USFWS, FWS/OBS-78/33. Fort Collins, Colorado. 130P.
- 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, Colorado. 172 p.
- Campo Erazo, Y. y Ruiz Cobo, D. 2001. Estimación del régimen de caudales ecológicos en el río Palacé, aguas abajo de la futura bocatoma que abastecerá de agua potable a la ciudad de Popayán. Tesis de Grado Biología Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Exactas y de la Educación. Popayán, Colombia. 111 P.
- Chow, V.T. 1959. Open-Channel Hydraulics. MacGraw-Hill Book Co. New York. 633 P.
- Diez Hernández, J.M. 2004. The Influence of 1D Hydraulic Simulation on the PHABSIM Habitat Index. Proceedings of Fifth International Symposium on Ecohydraulics. 12-14 septiembre. Madrid, España.
- Diez Hernández, J.M. 2005. Análisis comparativo de los métodos actuales de simulación hidráulica en PHASIM-IFIM y su influencia en la evaluación del hábitat fluvial. ProQuest-Information and Learning. España. 458 P.
- Diez Hernández, J.M. 2006a. Modelación fluvial multidimensional aplicada al cálculo de Caudales Ecológicos. Actas XVII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología (CD). 15-16/09/2006, Popayán.
- Diez Hernández, J.M. 2006b. Optimización de Datos Hidráulicos para los Estudios de Caudales Ecológicos. Actas XVII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología (CD). 15-16/09/2006, Popayán.
- Diez Hernández, J.M. y Martínez de Azagra, A. 2005. Complementary Hydraulic Technique for 1D Ecohydraulic Modeling in Fluvial Habitat Restoration Studies. Proceedings World Conference on Ecological Restoration (CD). 12-18/09/2005, Zaragoza, España.
- Diez Hernández, J.M. y Olmeda Sanz, S. 2004. Pautas para el establecimiento de un régimen de caudales ambientales en el río Mandeo (La Coruña). Actas IV Congreso Forestal Español (CD). Zaragoza, España.
- Elliot, C.N., Jonson, I.W., Sekulin, A.E., Dunbar, M.J. y Acreman, M.C. 1996. Guide to the use of the Physical Habitat Simulation System. Enviroment Agency, Institute of Hydrology. Bristol, Reino Unido.
- García de Jalón, D., Casado, C., Barceló, E., Mayo, M., Soriano, O., Castro, I., Rodríguez, F., y Navarro, R. 1987. Valoración ecológica de la red fluvial de la Comunidad de Madrid. Dirección General de Recursos Hidráulicos. Comunidad Autónoma de Madrid. España.
- Ghanem, A., Steffler, P., Hicks, F. y Katopodis, C. 1995. Two Dimensional Finite Element Modeling of Flow in Aquatic Habitats. Water Resources Engineering Report No. 95-S1. Department of Civil Engineering.

- University of Alberta. Edmonton, Alberta, Canadá.
- Guay, J.C., Boisclair, D., Rioux, D., Leclerc, M., Lapointe, M. y Legendre, P. 2001. Science on the edge of spatial scales: a reply to the comments of Williams (2001). Canadian J. Fisheries Manag, 20: pp 1016-1028.
- Hardy, T.B. y Addley, R.C. 2003. Instream Flow Assessment Modelling: Combining Physical and Behavioral Based Approaches. Special issue of the Canadian Water Resources Journal, 28(2) pp273-282.
- Jorde, K., Schneider, M., Peter, A. y Zoellner, F. 2001. Fuzzy based models for the evaluation of fish habitat quality and instream flow assessment. Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics, ISEH.
- Katopodis, C. 2003. Case studies of instream flow modelling for fish habitat in Canadian Prairie Rivers. Special issue of the Canadian Water Resources Journal. State-of-the-art in habitat modelling and conservation flows, 28(2): pp 199-216.
- Lamouroux, N. 1999. Discussing hydraulic modeling trends in instream habitat studies. En: Proceedings of the 3rd International Symposium on Ecohydraulics. Salt Lake City, Utah. Lamouroux, N y Souchon, Y. 2002. Simple predictions of instream habitat model outputs for fish habitat guilds in large streams. Freshwater Biology, 47: pp 1531-1542.
- Leclerc, M. 2004. Ecohydraulics: a new interdisciplinary frontier for CFD. Workshop 2D Ecohydraulic Simulation. V International Symposium on Ecohydraulics, 14-14/09/04, Madrid, España. 34 P.
- Leclerc, M., Boudreault, A., Bechara, J.A. y Corfa, G. 1995. Two-Dimensional Hydrodynamic Modeling: A Neglected Tool in the Instream Flow Incremental Methodology. Transactions of the American Fisheries Society, 124: pp 645-662.
- Morin, J., Leclerc, M., Secretan, Y. y Bodreau, P. 2000. Integrated Two-Dimensional macrophytes-hydrodynamic modelling: Application to Lake Saint-Francois (St. Lawrence River, Québec, Canadá). Journal of Hydraulic Research (IAHR), 3(38): pp 163-172.
- Parasiewicz, P. 2001. MesoHABSIM: A concept for application of instream flow models in river restoration planning. Fisheries, 26 (9): pp 6-13.
- Payne, T.R. 2003a. The number of transects required to compute a robust PHABSIM Habitat Index. International IFIM User's Workshop.
- Payne, T.R. 2003b. The influence of Multiple Velocity Calibration Sets on the PHABSIM Habitat Index. International IFIM User's Workshop.
- Payne, T.R. y Diez Hernández, J.M. 2004. Riverine Habitat Simulation Software RHABSIM 3.0 - Spanish Version. Proceedings of Fifth International Symposium on Ecohydraulics. 12-14 sept. Madrid, España.
- Rodi, W. 1984. Turbulence models and their application in Hydraulics. IAHR, Delft, Holanda.
- Saad, Y. y Schultz, M.H. 1986. GMRES: A generalizad minimal residual algorithm for solving nonsymmetric linear systems. SIAM Journal Sciences Statistics Computational, 7(3): pp 856-869.
- Sanz Ronda, F.J. 2004. Evaluación de diferentes técnicas de muestreo utilizadas en la cuantificación del hábitat fluvial. Tesis Doctoral Universidad de Valladolid. Valladolid, España.
- Scheneider, M. y Jorde, K. 2003. Fuzzy-ruled based models for the evaluation of fish habitat quality and instream flow assessment. IFIM User's Workshop.
- Secretan, Y., Leclerc, M., Duchesne, S. y Heniche, M. 2001. Une méthodologie de modélisation numérique de terrain pour la simulation hydrodynamique 2D. Revue des Sciences de éau, 14(2): pp 187-212.
- 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.
- Steffler, P. y Blackburn, J. 2002. Two-dimensional depth averaged modelling and user's manual. University of Alberta. Alberta, Canadá.
- Tarbet, K. y Hardy, T.B. 1996. Evaluation of one-dimensional and two-dimensional hydraulic modeling in a natural river and implications in instream flow assesment methods. pp: B395-406, Quebec, Canadá.
- Van Rijn, L.C. 1990. Principles of Fluid Flow and Surface Waves in Rivers, Estuaries, Seas and Oceans. Aqua Publications, Amsterdam, Holanda.
- Waddle, T. 1998. Development of 2-Dimensional habitat models. Pp:19-22 en: Hydroecological modelling: research, practice, legislation, and decision-making. Blazkova, S., Stalnaker, C. y Novicky, O. (Eds). T.G. Masaryk Water Research Institute (Praga, Chequia) y MESC (Fort Collins, CO).
- Waddle, T. (Ed). 2001. PHABSIM for Windows: User's Manual and Exercises. U.S. Geological Survey. Fort Collins, Colorado. 288 P.