

Optimización de Datos Hidráulicos para los Estudios de Caudales Ecológicos

Juan Manuel Diez Hernández

Ingeniero Forestal, PhD Ecohidráulica.

Profesor Grupo de Hidráulica e Hidrología, ETS Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid, España.
Av. Madrid 57, 34004 Palencia, España. Correo-e: jmdiez@iaf.uva.es

XVII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología

Sociedad Colombiana de Ingenieros
Asociación Caucana de Ingenieros
Universidad del Cauca
Corporación Autónoma Regional del Cauca

Popayán, 15 y 16 de septiembre de 2006

Resumen. Los Caudales Ecológicos están teniendo una relevancia creciente en las reivindicaciones ambientales de la sociedad y también en el marco normativo Colombiano y. Los regímenes de caudales ambientales exigidos en la Ley del Agua pueden determinarse de modo confiable con la metodología IFIM-PHABSIM, que es la más utilizada y acreditada en el ámbito mundial. El costo de un estudio IFIM de caudales ambientales viene determinado en gran medida por el esfuerzo de medición en campo de la información hidráulica necesaria para calibrar adecuadamente los modelos predictivos de profundidades y velocidades. Sin embargo, en los análisis IFIM el objetivo es obtener unas relaciones funcionales entre el Caudal y el Hábitat que sean confiables e interpretables, pero no necesariamente unas predicciones hidráulicas inmejorables. Este trabajo identifica la información hidráulica necesaria para fundamentar unos estudios IFIM normales de caudales ecológicos, con un balance optimizado entre la precisión y el coste de un estudio.

Palabras Clave: caudales ecológicos, caracterización fluvial, optimización, IFIM

1. Los Estudios de Caudales Ecológicos en el Contexto Colombiano

El nuevo marco legislativo Colombiano en materia de protección de los recursos acuáticos, recoge la demanda social creciente de una gestión hídrica verdaderamente ambiental. La Ley del Agua (actualmente en debate) incorpora explícitamente la necesidad de respetar en las corrientes fluviales un “caudal ecológico”, que salvaguarde la integridad estructural y funcional de los ecosistemas acuáticos (Art. 21). Adicionalmente, la licencia ambiental que precisan las grandes obras hidráulicas de regulación según la Ley Ambiental 99/1993, debería otorgarse siempre que el régimen de caudales propuesto satisfaga los requerimientos ecosistémicos. De modo implícito, varios acuerdos internacionales suscritos por Colombia reconocen el compromiso de respetar unos caudales fluviales aceptables: Conservación de la Diversidad Biológica (1992), RAMSAR (1971), Hombre y Biosfera de UNESCO (1971) y AICAS (2000) entre otros.

De los más de 200 métodos que se utilizan en unos 50 países para determinar Regímenes de Caudales Ecológicos (Statzner et al., 2000), sin duda los recientes enfoques Ecohidráulicos son los más avanzados y contrastados científicamente. La investigación de King (1999) indica que el procedimiento de este tipo preferido en el ámbito mundial es la metodología IFIM “Instream Flow Incremental Methodology”, la cual incorpora el modelo conceptual PHABSIM (“Physical Habitat Simulation System”) propuesto por Bovee (1982) para evaluar el efecto de una variación de caudal en la disponibilidad de hábitat físico en un tramo fluvial y fijar unos caudales aceptables. Pensamos que IFIM tiene una capacidad notable para modelar el hábitat acuático de ríos de Colombia satisfactoriamente, y determinar caudales ecológicos confiables. Para su aplicación informatizada, el potente programa comercial RHABSIM 3.0 en español (Diez Hernández y Payne, 2005) ha demostrado su capacidad y robustez en ríos de anchura variada: desde unos pocos metros (p.ej. Palacé, Cauca) hasta más de 800 m (ej. Magdalena, Calamar – Bolívar). Este trabajo identifica la información hidráulica de campo que resulta necesaria para un estudio IFIM de caudales ecológicos confiable, que optimice el balance entre la precisión y el coste.

2. Metodología Incremental IFIM para calcular Caudales Ecológicos

El esquema operativo desarrollado por el Servicio de Pesca y Vida Silvestre Estadounidense IFIM (Bovee, 1982) integra procedimientos analíticos ecohidráulicos y ecohidrológicos con la finalidad de evaluar los efectos de cambios de caudal en la calidad del hábitat fluvial. Las primeras aplicaciones de IFIM en Iberoamérica provienen de España (García de Jalón et al., 1987) y Portugal (Costa et al., 1988). En Colombia, conocemos el estudio pionero de Campo y Hernández (2002) en el río Palacé (Cauca), referencial en cuanto al protocolo de caracterización fluvial y análisis ecohidráulico. Las pautas procedimentales propuestas por Diez Hernández y Burbano (2006) para Colombia, focalizan en una estandarización de los procesos que produzca resultados comparables y defendibles. Algunos aspectos esenciales de IFIM han sido examinados recientemente, como son 1) las técnicas de muestreo utilizables (Sanz Ronda, 2004) y 2) la capacidad de los modelos de simulación hidráulica y del hábitat incorporados (Diez Hernández, 2005).

El modelo ecohidráulico PHABSIM que incorpora IFIM para evaluar el hábitat fluvial (Fig.1), desarrolla una simulación hidráulica que proporciona las profundidades y velocidades medias en cada punto de una malla estructurada que conforma el sistema de representación del cauce. Estas predicciones se combinan adecuadamente con unos Criterios seleccionados de Idoneidad del Hábitat del organismo objetivo, para desarrollar las decisivas relaciones funcionales entre el Caudal y un Índice de Idoneidad del hábitat acuático (generalmente la Superficie Ponderada Útil – “SPU”). El análisis temporal de las respuestas de cada alternativa de regulación en términos de hábitat, facilita la fijación concertada de caudales ecológicos.

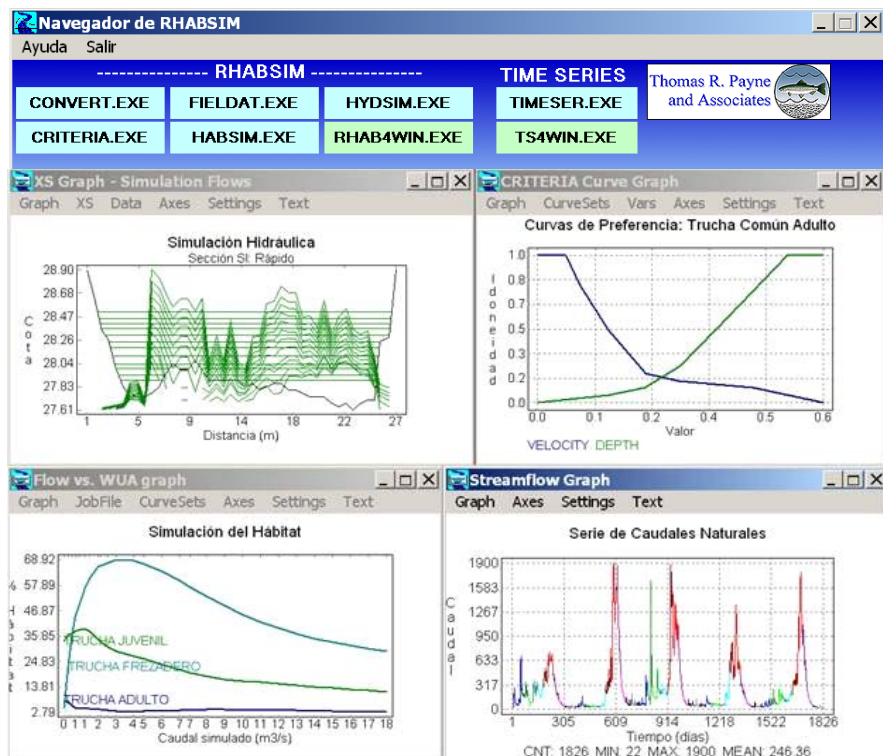


Figura 1. Resultados gráficos principales de una simulación informatizada del hábitat físico PHABSIM. Arr.lzqda: simulación hidráulica de profundidades y velocidades en una sección transversal representativa. Arr.Dcha: curvas de preferencia bivariables (velocidad y profundidad) de la especie íctica objetivo del estudio. Ab.lzda: relaciones funcionales Q-SPU para los estadios vitales analizables. Ab. Dcha: Serie temporal de hábitat asociada al régimen de caudales natural. Ejecución informatizada con el software RHABSIM 3.0 en español.

El enfoque clásico en una dimensión (1D) simplifica la variabilidad morfológica de un tramo fluvial en varias secciones transversales representativas, conceptualizadas como compuestas de múltiples subsecciones rectangulares denominadas “celdas”, cuya agregación global constituye una malla de paralelepípedos que abarca todo el dominio de flujo modelable (Fig.2). La simulación hidráulica de PHABSIM (Waddle, 2001) aplica métodos estadísticos simples y ecuaciones de flujo permanente seleccionables, para predecir secuencialmente las profundidades y las velocidades medias en cada celda, dentro del intervalo de caudales analizable.

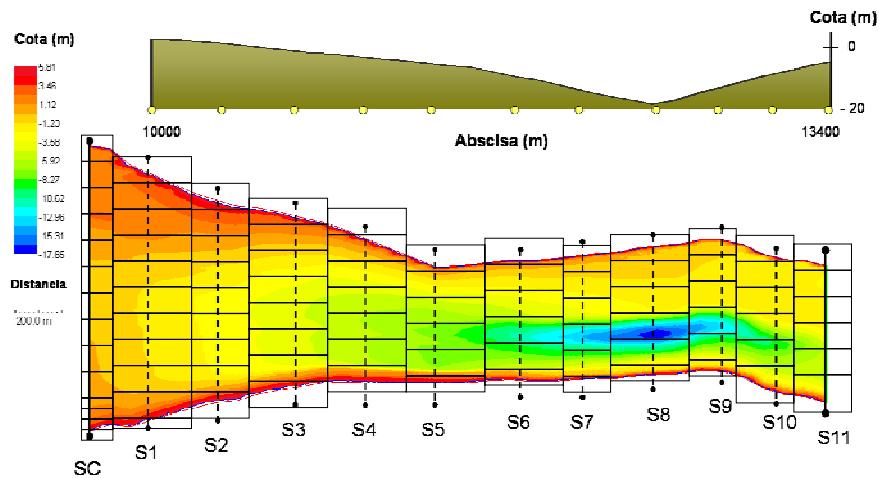


Figura 2. Esquema de representación del cauce utilizado en la modelación hidráulica 1D.

Las profundidades simuladas para un caudal derivan del correspondiente NSL, deducido de la curva de calibración de la sección, que se calcula mediante alguno de los siguientes esquemas de solución para un flujo permanente: 1) ecuación de Manning para un régimen uniforme, aplicada con una conductividad variable en un área de flujo efectiva (modelo MANSQ); 2) método del “paso estándar” para un régimen gradualmente variado en secciones compuestas, con un patrón definido de variación del coeficiente de Manning con el caudal (modelo WSP); 3) ajuste de regresión lineal bilogarítmica de mínimos cuadrados entre el NSL y el Caudal (modelo STGQ); o bien la 4) entrada directa de las predicciones con otras técnicas externas (p.ej. HEC-RAS). Durante la simulación de velocidades se maneja cada sección transversal como compuesta de múltiples celdas, en cada una de las cuales se asume un flujo permanente y uniforme que se resuelve mediante tres técnicas configurables que emplean diferente número de distribuciones horizontales de velocidad observadas. La primera denominada “3-velocity regression” es aplicable con tres o más distribuciones, y ajusta una regresión bilogarítmica lineal entre la velocidad media en una celda y el caudal total. El segundo método “1-velocity” emplea una distribución de velocidades, presuponiendo un flujo unidimensional estricto que resuelve mediante una expresión conjunta de las ecuaciones de Manning y de continuidad, simplificada en cada celda para deducir un coeficiente de rugosidad que se considera constante. En ausencia de distribuciones de velocidades observadas, el tercer método “no-velocity” aplica en todas las celdas la misma expresión simplificada del anterior “1-velocity”, pero con unos coeficientes de rugosidad prefijados por el modelador, para lograr un cumplimiento aceptable de la ecuación de continuidad. El método alternativo desarrollado por Díez Hernández y Martínez de Azagra (2005) denominado "LogD" aplica la ley universal de Prandtl-von Kármán de distribución vertical de velocidades logarítmica en diferentes algoritmos, dependiendo del número de observaciones: los resultados obtenidos en las condiciones ecohidráulicas básicas de ríos de California (EEUU) y España revelan unas capacidades predictivas superiores a las de los métodos homólogos convencionales, reduciendo el error de simulación más del 6% cuando se dispone de tres velocidades (3-vel) y más del 8% cuando se utiliza sólo una velocidad (1-vel).

2. Metodología

Se ha simulado la hidráulica y el hábitat acuático en 120 secciones representativas de tres tipos básicos de hábitat (rápidos, tablas y remansos) en tres tramos fluviales característicos (alta-media-baja pendiente). Los datos procesados con el software RHABSIM 3.0 en español proceden del archivo informático del Grupo de Hidráulica e Hidrología de la Universidad de Valladolid (España) y de la consultora Thomas R. Payne & Associates (California, EEUU). Conceptuando a un hábitat fluvial como un área relativamente homogénea con una velocidad, profundidad y sustrato característicos (Roussel y Bardonnnet 1997), hemos clasificado como “rápidos” las zonas con control hidráulico de cauce, donde la superficie libre es prácticamente paralela al lecho y la corriente es agitada, somera (<30 cm) y rápida (>30 cm/s). Las “tablas” son lugares sin remanso ni obstrucciones, donde la corriente es ligeramente agitada, veloz y algo más profunda (30-60 cm). En los “remansos” se produce control hidráulico de sección y un marcado remanso, en el que la corriente es lenta (<30 cm/s) y profunda (>60 cm). De acuerdo con la tipología utilizada, un tramo de alta-pendiente presenta un cauce estrecho (5-10 m), con sustrato grueso (bloques y roca) y alta pendiente (>1%). El tramo de moderada-pendiente incluye un cauce mayor (10-40 m), de sustrato intermedio (guijarros y gravas) y menor pendiente (<1%). En el tramo de baja-pendiente el cauce es amplio (40-65 m), el sustrato más fino (gravas) y la pendiente escasa (<<1%).

El protocolo de medición siguió las directrices estipuladas en los manuales referenciales (Trihey y Wegner 1981; Bovee 1997), incorporando unas pruebas suplementarias para controlar la calidad de la información topográfica e hidráulica. El aforo de cada sección se efectuó conforme a las directrices definidas por Rantz (1982), estableciendo un mínimo de 20 celdas mojadas y no menos de 15 verticales mojadas durante el caudal menor. Para ello se utilizaron correntímetros mecánicos de eje vertical del tipo “PriceAA” y “Pygmy”. Se capturaron en cada sección las distribuciones de velocidades completas correspondientes a tres caudales que abarcaban el rango modelable y medible de modo seguro.

El Índice de Hábitat (SPU) se ha simulado dentro del rango aceptado (Bovee y Milhous, 1978), según el esquema normal HABTAE con cuatro criterios de preferencia genéricos que combinan rangos definidos de velocidad y profundidad (zonas rápidas/someras, rápidas/profundas, lentas/someras, y lentas/profundas), empleando una agregación geométrica de preferencias, y un tratamiento de celda central que posibilita relacionar las predicciones hidráulicas y ecológicas.

Se han analizado las discrepancias entre las velocidades observadas y las simuladas en cada celda, en términos de errores absolutos y relativos, así como las desviaciones típicas para cada caudal simulado. Agregando jerárquicamente estos errores en cuatro niveles (caudal–celda–sección–hábitat) se han calculado los Errores Relativos Medios (ERM) y los Errores Absolutos Medios (EAM), así como sus correspondientes desviaciones típicas, que expresan el desatino de las predicciones en un hábitat determinado.

2. Resultados

La calidad de la simulación hidráulica realizada con modelos de velocidades se muestra en la Tabla 1, evaluada en términos de Errores Relativos Medios (ERM) y Errores Absolutos Medios (EAM). El enfoque “3-vel” realiza el mejor trabajo en todos los ambientes, con desatinos relativos del 4% al 13%, y valores absolutos entre 1,30 cm/s y 3,10 cm/s. El secundario “1-vel” genera unos errores dobles o triples que los anteriores. Los errores del simple “no-vel” se elevan al rango del 40% al 50% y entre 9 cm/s y 15 cm/s. Analizando las tipologías ecohidráulicas, las predicciones son más acertadas cuanto más homogéneas son las condiciones hidráulicas. El escalafón en cuanto a hábitats (remansos>tablas>rápidos) y tramos fluviales (baja pendiente>media>alta) es común en términos de errores relativos y absolutos.

Tabla 1. Errores Relativos Medios (ERM) y Errores Absolutos Medios (EAM) de las configuraciones destacadas de los modelos de velocidades, en tres hábitats básicos (rápidos, tablas y remansos) de tres tipos tramos fluviales estudiados (alta-pendiente, media-pendiente y baja-pendiente).

Tramo Fluvial (Pendiente)	ERM (%)			EAM (cm/s)		
	Rápidos	Tablas	Remansos	Rápidos	Tablas	Remansos
3-velocity regression						
Alta	5,90	11,01	12,80	2,50	6,16	3,81
Media	6,01	7,80	10,09	2,16	2,46	2,72
Baja	5,09	3,64	8,31	1,84	1,15	1,98
1-velocity						
Alta	26,02	29,25	27,98	5,11	8,24	9,6
Media	21,51	23,10	26,18	4,30	6,74	8,63
Baja	18,45	10,21	21,18	3,39	3,16	6,03
No-velocity						
Alta	41,20	46,24	50,02	9,69	10,02	13,69
Media	40,98	40,25	48,13	9,48	8,86	13,71
Baja	39,51	37,55	46,62	9,09	8,48	13,02

Para evaluar estadísticamente las respuestas del método superior “3-vel”, se ha realizado ajustes de regresión entre los valores de velocidad predichos y los observados en las celdas elegidas aleatoriamente dentro de secciones representativas de los hábitats. A modo de ejemplo, la Figura 3 muestra lo ocurrido en los tres hábitats de los tramos fluviales extremos. Como en todos los casos, las relaciones entre las velocidades medidas y las simuladas son significativas. Por otro lado, los altos coeficientes de determinación r^2 indican una elevada representatividad de los modelos y confirman el incremento de la predictibilidad a medida que las condiciones del entorno hidráulico se lentifican.

La ejecución de los tres algoritmos predictivos en términos de hábitat (SPU) con las cuatro curvas de preferencia gremiales, han revelado que “3-vel” nuevamente hace la mejor labor, logrando siempre los menores Errores Relativos Medios de Hábitat (ERMH). La idoneidad más sensible de las cuatro estudiadas

respecto a los errores de la simulación hidráulica ha sido la correspondiente a zonas profundas y lentas. La Tabla 2 muestra los Errores Relativos Medios de Hábitat para la curva de preferencia anterior, asociados a los tres métodos hidráulicos en todos los ambientes ecohidráulicos testados.

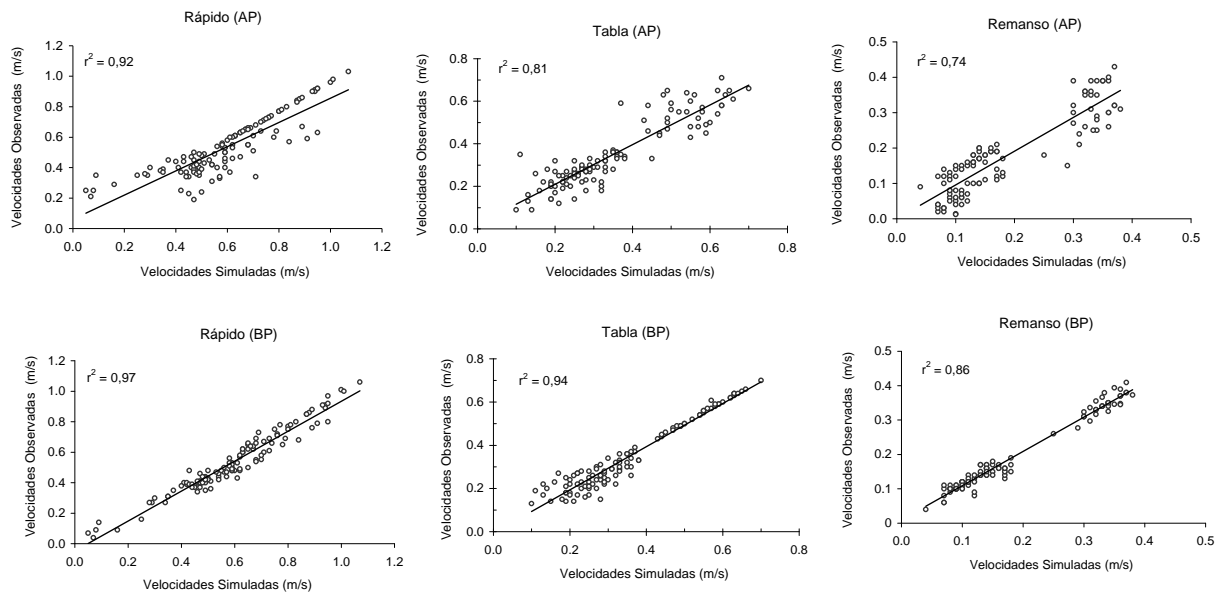


Figura 3. Relaciones entre las velocidades medias en una celda observadas y las simuladas con el modelo “3-velocity” en tres hábitats básicos (rápido, tabla, remanso) localizados en dos de los tramos fluviales característicos: Alta-Pendiente (AP) y Baja-Pendiente (BP). Cada regresión muestra el coeficiente r^2 , que indica el porcentaje de la variabilidad observada que se explica por este modelo.

Tabla 2. Errores Relativos Medios de Hábitat (ERMH) ligados a los tres métodos de simulación de velocidades para la curva gremial de zonas profundas y lentas, revelada como la más sensible. Se agrupan para los hábitats básicos (rápidos, tablas y remansos) en los tres tipos de tramos fluviales (alta-media-baja pendiente).

Modelo Velocidad	ERMH (%)		
	Rápidos	Tablas	Remansos
Alta - pendiente			
3 - vel	4,63	2,60	2,85
1 - vel	6,37	2,30	3,12
no - vel	27,69	11,52	9,14
Media - pendiente			
3 - vel	3,21	1,90	1,68
1 - vel	6,20	2,01	2,14
no - vel	19,45	8,25	7,25
Baja - pendiente			
3 - vel	1,87	1,15	0,62
1 - vel	5,75	1,74	1,32
no - vel	14,36	4,25	5,62

Para evaluar la significación de las diferencias predictivas entre “3-vel” y “1-vel” en términos de hábitat se han realizado análisis ANOVA con las observaciones de cada hábitat, consideradas como muestras independientes. En todos los ambientes, no se observan diferencias significativas entre las respuestas de ambos enfoques ($p>0,05$), lo que demuestra que el procedimiento de cálculo del hábitat amortigua notablemente los errores cometidos en la simulación hidráulica.

Adicionalmente, se ha examinado las respuestas de los modelos hidráulicos en todo el intervalo de simulación del hábitat. A modo de ejemplo, se presenta en la Figura 4 lo sucedido en las tablas del tramo de baja pendiente con la curva gremial demostrada más sensible, que representa el patrón observado en el resto de ambientes. Las discrepancias encontradas entre las predicciones de “3-vel” y “1-vel” han sido menores del 5%.

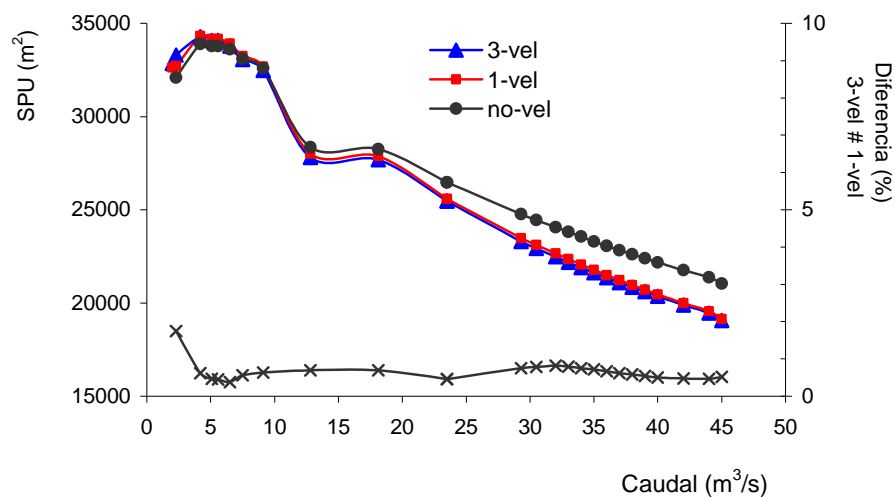


Figura 4. Simulación del Índice de Hábitat (SPU) en las tablas del tramo de baja pendiente con los tres modelos de velocidades, para la preferencia de zonas profundas/lentas. El eje secundario muestra la diferencia relativa entre las predicciones a partir de tres velocidades (3-vel) y solamente de una (1-vel).

4. Discusión

Los resultados demuestran inequívocamente que “3-vel” es el modelo de simulación de velocidades con mayor capacidad predictiva en términos hidráulicos (tabla 1 y figura 3). Las diferencias significativas respecto al secundario “1-vel” demuestran que, desde una perspectiva hidráulica estricta, conviene capturar en campo más distribuciones de velocidades completas, habida cuenta que posibilitan una mayor precisión. Estos hechos concuerdan con lo detectado previamente por Díez Hernández y Martínez de Azagra (2004, 2005) en características fluviales comparables, pero menos representadas.

En cualquier caso, en los análisis IFIM-PHABSIM no hay que perder de vista que la finalidad es obtener unas relaciones funcionales Hábitat-Caudal confiables e interpretables para determinar caudales ambientales, pero no unas predicciones inmejorables de velocidades y profundidades. En este sentido, los resultados presentados en la tabla 2 y figura 4 resultan reveladores al demostrar que, en términos de hábitat, no existen diferencias significativas entre simular los campos de velocidades a partir de 3 velocidades medidas en campo, o bien solamente a partir de un registro. Esto se debe al conocido efecto amortiguador del error de la modelación hidráulica generado al computar el hábitat acuático en el procedimiento PHABSIM (Díez Hernández, 2005). En consecuencia, en los estudios IFIM de caudales ambientales, tiene poco sentido el procedimiento antieconómico de medir en campo más de una distribución horizontal de velocidades completa, ya que no supone mejora apreciable en la evaluación del hábitat fluvial. En su lugar, resulta más práctico destinar esos recursos a otros aspectos relevantes de PHABSIM, como obtener unas curvas de preferencia confiables o mejorar la caracterización del cauce con más secciones transversales.

5. Conclusiones

La simulación de campos de profundidades y velocidades es una etapa elemental del marco conceptual ecohidráulico PHABSIM, que determina en gran parte el coste de un estudio de caudales ambientales. Los resultados obtenidos corroboran que la simulación del hábitat es muy robusta respecto a los errores asociados de predicción del microambiente hidráulico. En consecuencia, resulta posible obtener unas relaciones funcionales hábitat-caudal confiables para un estudio IFIM ordinario de caudales ecológicos, a partir de la medición de una distribución horizontal completa de velocidades medias en las celdas.

El protocolo de caracterización hidráulica optimizado para un estudio IFIM de caudales ambientales, genera unas recomendaciones confiables con un balance equilibrado entre la precisión y el coste: consiste en modelar los Niveles de Superficie Libre a partir de tres observaciones, y las velocidades medias mediante el algoritmo "1-velocity" calibrado con un solo perfil horizontal de velocidades medido con seguridad durante un caudal alto.

Agradecimientos: La Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI) ha financiado este trabajo mediante una beca postdoctoral.

6. Bibliografía

- BOVEE, K. D. 1982. *A guide to stream habitat analysis using the Instream Flow Incremental Methodology*. Instream Flow Information Paper No. 12. U.S. Fish and Wildlife Service, FWS/OBS-82/26. Fort Collins, Colorado.
- BOVEE, K.D. 1997. *Data collection procedures for the Physical Habitat Simulation System*. U.S. Geological Survey, Biological Resources Division, Mid-continent Ecological Science Center. Fort Collins, Colorado.
- BOVEE, K.D. y MILHOUS, R.T. 1978. *Hydraulic simulation in Instream Flow studies: theory and techniques*. Instream Flow Information Paper No. 5. U.S. Fish and Wildlife Service, FWS/OBS-78/33. Fort Collins, Colorado.

- CAMPO, Y. y HERNÁNDEZ, D. 2002. *Estimación del Régimen de Caudales Ecológicos en el río Palacé (Cauca)*, Tesis de Grado Biología, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.
- COSTA, M. J. 1988. Utilização das curvas de probabilidade de uso de habitat em estudos de determinação do impacto ambiental nos peixes. *Actas do Colóquio Luso Espanhol sobre Ecologia das Bacias Hidrográficas e Recursos Geológicos*, 73-79. Instituto de Zoologia e Estação de Zoologia Marítima "Dr. Augusto Nobre". Faculdade de Ciências do Porto. Oporto.
- DIEZ HERNÁNDEZ, 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 HERNÁNDEZ, J.M. y MARTÍNEZ DE AZAGRA, A. 2004. The Influence of 1D Hydraulic Simulation on the PHABSIM Habitat Index. *Proceedings Fifth International Symposium on Ecohydraulics*, september 12-17, 2004, Madrid, Spain.
- 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*. 12-18/09/2005, Zaragoza, España.
- DIEZ HERNÁNDEZ, J.M y PAYNE, T.R. 2005. Software en español para definir Caudales Ecológicos RHABSIM 3.0. *Revista de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente EIDENAR*, Vol. 111, 1 (3).
- DIEZ HERNÁNDEZ, J.M y BURBANO, L. 2006. Técnicas avanzadas para la evaluación de Caudales Ecológicos en el ordenamiento sostenible de cuencas hidrográficas. *Ingeniería e Investigación*, Vol.26 (1): 58-68
- GARCÍA DE JALÓN, D., CASADO, C., y OTROS. 1987. *Valoración ecológica de la red fluvial de la Comunidad de Madrid*. Dirección General de Recursos Hidráulicos. Comunidad Autónoma de Madrid, Madrid, España.
- KING, J. 1999. Environmental Flows for Fluvial Maintenance and Conservation. *Proceedings of Fifth International Symposium on Ecohydraulics*, Madrid (España), Universidad Politécnica de Madrid, 12-14 septiembre 2004, pp. 25-37.
- RANTZ, S.E. 1982. *Measurement and computation of streamflow: Volume 1. Measurements of stage and discharge*. United States Geological Survey Water Supply Paper 2175.
- ROUSSEL, J. M. y BARDONNET, 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 Francais de la Peche et de la Pisciculture* 346: 573-588.
- SANZ RONDA, F.J. 2004. *Evaluación de diferentes técnicas de muestreo utilizadas en la cuantificación del hábitat fluvial*. Tesis Doctoral, ETS Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid, España.
- STAZTNER, B., CAPRA, H., HIGLER, L.W.G. y ROUZ, A.L. 2000. Focusing Environmental Management Budgets on Non-linear System Responses: Potential for Significant Improvements to Freshwater Ecosystem. *Freshwater Biology*, 37, 1997, pp. 463-472.
- TRIHEY, E.W. y WEGNER, D.L. 1981. *Field data collection for use with the physical habitat simulation system of the instream flow group*. United States Fish and Wildlife Service.
- WADDLE, T. (Ed). 2001. *PHABSIM for Windows: User's Manual and Exercises*. U.S.G.S. Fort Collins, Colorado. EEUU.