

Desarrollo de un modelo de velocidad complementario para la evaluación ecohidráulica del hábitat fluvial

Juan Manuel Diez Hernández¹ & Andrés Martínez de Azagra Paredes²

1 Grupo de Hidráulica e Hidrología, Universidad de Valladolid, España

Grupo de Estudios en Recursos Hidrobiológicos Continentales, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.

2 Grupo de Hidráulica e Hidrología, Universidad de Valladolid, España

jmdiez@iaf.uva.es

Recibido para evaluación: 07 de Marzo de 2008 / Aceptación: 06 de Mayo de 2008 / Versión Final: 29 de Mayo de 2008

Resumen

Los modelos hidráulicos unidimensionales tienen capacidad para resolver los campos de velocidad que precisa el conocido sistema ecohidráulico PHABSIM ("Physical Habitat Simulation System"), para desarrollar unas relaciones funcionales confiables entre el caudal y un índice evaluador de la idoneidad del hábitat acuático. Se presenta un método de simulación de velocidad complementario al integrado en PHABSIM, que se ha denominado "LogD" ("Logarithmic Distribution"), el cual es aplicable en un flujo permanente, uniforme y turbulento hidráulicamente rugoso. Utiliza la conocida distribución vertical de velocidades logarítmica de Prandtl-von Kármán, promediada en profundidad y extendida espacialmente a una celda. Las simulaciones realizadas en 135 secciones representativas de tres tipos básicos de hábitat (rápidos, tablas y remansos) en tres tipologías fluviales características (alta-pendiente, moderada-pendiente y baja-pendiente) revelan una capacidad predictiva interesante. El algoritmo diseñado para ser calibrado con una distribución horizontal de velocidad resulta competitivo respecto al método homólogo actual. Los errores de simulación relativos y absolutos son menores y menos dispersos cuando el esquema de solución se ajusta con más de una distribución horizontal completa de velocidad, si bien el balance precisión-coste del resultado con sólo una resulta conveniente en muchos casos.

Palabras Clave: Ecohidráulica, modelo hidráulico, PHABSIM, simulación de velocidad, "LogD".

Abstract

One-dimensional hydraulic models have the ability of solving the velocity fields needed by the well-known eco-hydraulic system PHABSIM ("Physical Habitat Simulation System"), in order to develop reliable functional relations between the discharge and a suitability index of the aquatic habitat. This paper presents a velocity simulation method that is complementary to the one integrated in PHABSIM, which we have called "LogD" ("Logarithmic Distribution"). It is applicable to a steady, uniform and hydraulically turbulent rough flow. This method uses the logarithmic velocity distribution of Prandtl-von Kármán, depth-averaged and spatially extended to one cell. The simulations carried out on 135 representative cross sections of three basic habitat types (riffles, runs and pools) and on three different characteristic fluvial types (high-gradient, moderate-gradient and low-gradient) reveal an interesting predictive skills. The algorithm is calibrated using one horizontal velocity distribution shows a good performance when compared with current homologous method. The relative as well as the absolute simulation errors are smaller and less disperse when the solution scheme is calibrated with more than one velocity sets, although the accuracy-cost balance of the result obtained with one set is convenient.

Key Words: Ecohydraulics, hydraulic model, PHABSIM, velocity simulation, "LogD".

1. Evaluación Ecohidráulica del Hábitat Fluvial

Los modelos clásicos de resistencia hidráulica en conducciones abiertas se usan progresivamente desde hace algo más de dos décadas para simular las condiciones ecológicas del hábitat acuático fluvial. Este reciente ámbito científico denominado "Ecohidráulica" surgió en EE.UU. para evaluar los requerimientos ecológicos de hábitat físico de los ecosistemas lóticos afectados por alteraciones del régimen natural de caudales. Su premisa consiste en que el mapa de la distribución espacial del microhábitat hidráulico en un fragmento fluvial posibilita la evaluación de la disponibilidad de hábitat utilizable para los organismos objetivo, cuyas preferencias biológicas son conocidas. Esta faceta ecológica de la hidráulica fluvial proporciona herramientas ingenieriles confiables para optimizar medidas de conservación y restauración de los hidrosistemas lóticos: determinación de regímenes de caudales ambientales, mejora del hábitat fluvial, restauración de riberas, diseño de pasos para peces, etc.

El marco conceptual de la evaluación ecohidráulica fluvial (Figura 1) asigna un papel fundamental al modelamiento hidráulico matemático, ya que proporciona las profundidades, velocidades y material del lecho en cada uno de los elementos discretizados del dominio hidrotopográfico (celdas) que están activos durante cada caudal simulado. Estas predicciones micro-hidráulicas se combinan adecuadamente con los criterios biológicos de preferencia de hábitat para los organismos acuáticos objetivo (p.ej. ictiofauna). El modelo más extendido para evaluar el efecto de cada variable con significación ecológica en la condición del microhábitat de una corriente (Bovee, 1982) expresa la idoneidad del micro-ambiente hidráulico mediante un coeficiente que varía entre cero (inadecuado) y uno (óptimo), el cual puede derivar de una función univariada (Fig. 1b, arriba) o bien del criterio de membresía ligado a una lógica difusa (Fig. 1b, abajo). La calidad global del ambiente acuático en cada celda que produce una descarga se determina mediante un Índice de Hábitat (IH), el cual agrega las idoneidades individuales de los parámetros. La ponderación estándar multiplica las idoneidades de la profundidad (lp), velocidad (lv), y material del lecho (lm): $IH = lv lp lm$. Adicionalmente a estas variables hidráulicas, se pueden incorporar

parámetros de calidad del agua (temperatura, materia orgánica, contaminantes, etc.), así como procesos ecológicos más complejos (bioenergética, dinámica poblacional, etc).

La extensión del algoritmo del modelo biológico a todas las celdas del dominio modelable del cauce produce la descripción predictiva de la distribución espacial del organismo objetivo, la cual está determinada por la disponibilidad de hábitat en función del caudal (Fig. 1c). La interpretación comprensiva de los campos de la variable ecohidráulica "calidad de microhábitat" simplifica la comparación de escenarios fluviales asociados a intervenciones de restauración (p.ej. caudales ecológicos) o de degradación (p.ej. encauzamiento), y al cambio climático. La aplicación de estos conceptos en Colombia se ilustra en la evaluación ambiental de caudales de Diez Hernández y Ruiz Cobo (2007) para la derivación del río Palacé hacia el nuevo acueducto de Popayán (Cauca).

2. Modelamiento Hidráulico del Hábitat

El sistema de caracterización fluvial convencional en un análisis ecohidráulico simplifica la variabilidad morfológica de un tramo mediante un conjunto de secciones transversales representativas, las cuales son conceptualizadas como compuestas de múltiples subsecciones rectangulares (celdas computacionales). La agregación global de las celdas conforma una malla de prismas cuadrangulares que representa el dominio de flujo (Fig. 1a). La simulación hidráulica genera los campos hidráulicos de las variables influyentes en el hábitat, resolviendo configuraciones optimizadas que pueden combinar las técnicas estadísticas y los modelos de resistencia hidráulica particularizados en los manuales de esta reciente Hidrociencia (Bovee et al., 1998; Waddle, 2001). El sistema predictivo del hábitat micro-hidráulico más difundido y acreditado es el denominado PHABSIM ("Physical Habitat Simulation System"), desarrollado por el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE.UU. (Bovee y Milhous, 1978) como el núcleo de una metodología para determinar caudales ecológicos. Las profundidades asociadas a un caudal determinado (Figura 2a) derivan del correspondiente Nivel de Superficie Libre (NSL)

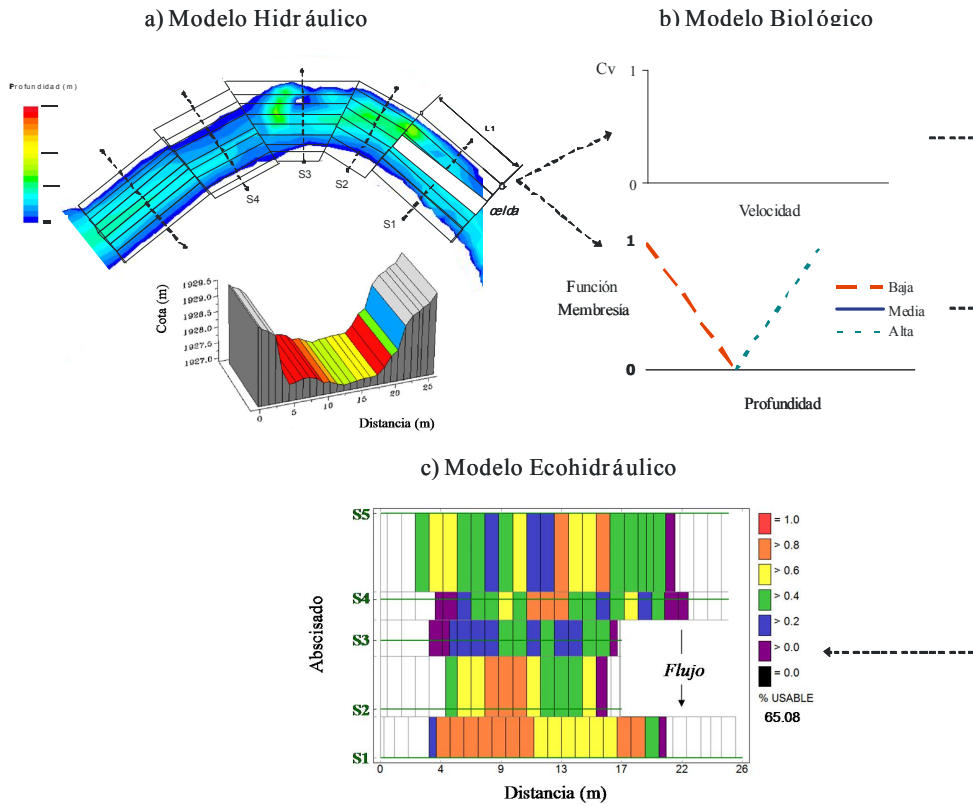


Figura 1. Esquema conceptual de la evaluación ecohidráulica del microhábitat fluvial. a) El Modelo Hidráulico genera la profundidad, velocidad y características del lecho en cada uno de los elementos discretizadores activos durante una descarga (celdas cuadriláteras en planta). b) El Modelo Biológico expresa la idoneidad del ambiente hidráulico mediante un coeficiente que varía entre cero y uno, derivado de una función univariable o bien de membresía difusa. c) El Modelo Ecohidráulico evalúa la oferta ecológica potencial de cada celda mediante un Índice de Hábitat, el cual puede codificarse en color para analizar distintos escenarios hidrológicos.

deducido de la curva de calibración de la sección, la cual se genera mediante alguno de los siguientes esquemas PHABSIM para flujos permanentes. 1) El modelo MANSQ aplica la ecuación de Manning para régimen uniforme, con una conductividad variable en el área de flujo efectiva. 2) Para flujos gradualmente variados, el modelo WSP resuelve el método del paso estándar con un patrón de variación rugosidad - caudal definido. 3) El modelo estadístico STGQ ajusta una regresión de mínimos cuadrados entre el NSL y el Caudal. Por último, 4) es posible importar otras predicciones externas (p.ej. HEC-RAS). Las particularidades de estas formulaciones y sus capacidades se examinan en algunos trabajos de Díez Hernández (2003, 2004).

La modelación de la velocidad concibe las secciones transversales divididas en suficientes celdas centradas en las verticales hidrotopográficas, en cada una de las cuales se presupone un flujo unidimensional (1D) estricto (Figura 2b). El modelo PHABSIM para este flujo permanente y uniforme se denomina "1-velocity", y resuelve una expresión combinada y simplificada de las ecuaciones de continuidad y de Manning:

$$Q = \sum \left(\frac{\sqrt{S}}{n_i} y_i^{\frac{2}{3}} A_i \right) \quad (1)$$

donde Q = caudal total; y S = pendiente hidráulica de la sección. Para un caudal definido, cada celda (i) posee su propia rugosidad n_i , profundidad y_i , y área mojada A_i . La calibración consiste en

deducir un coeficiente de rugosidad para cada celda, a partir de una de las distribuciones horizontales de velocidad registradas. Las rugosidades resultantes se consideran invariables durante la resolución de otros caudales, dejando que el balance de masas reproduzca unas velocidades definitivas que sean coherentes con el régimen permanente.

A pesar de la importancia del componente hidráulico en la ecohidráulica fluvial, se ha investigado poco el potencial de otros

métodos hidráulicos ID en la simulación de velocidades. De hecho, las técnicas actuales se diferencian poco de las originales PHABSIM presentadas hace tres décadas en el célebre "Instream Flow Paper No.5" (Bovee y Milhous, 1978). Este trabajo desarrolla un modelo alternativo de velocidad que utiliza la misma información de partida que el convencional "I-vel" de PHABSIM, y analiza comparativamente sus respectivas capacidades en varios ambientes fluviales básicos.

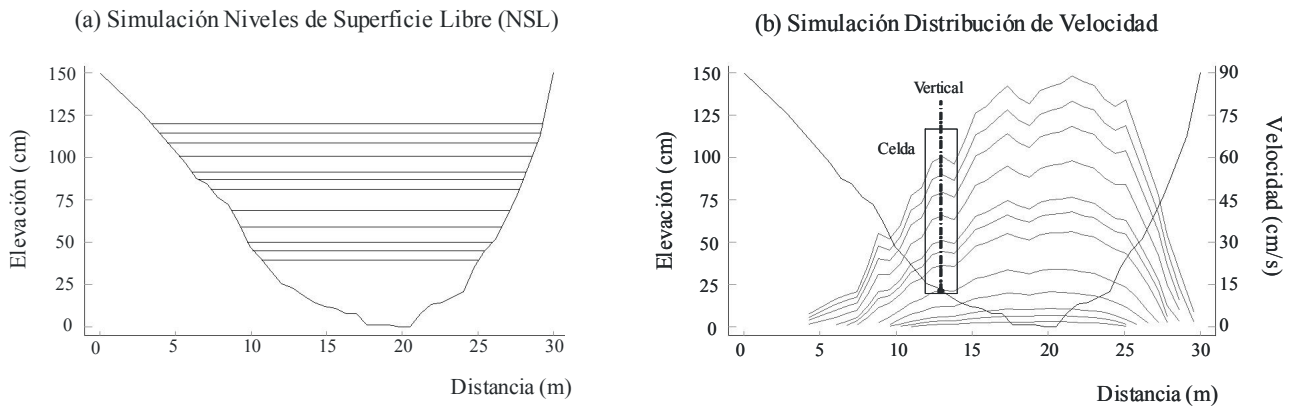


Figura 2. Simulación hidráulica de varios caudales en una sección transversal representativa, dirigida a la evaluación ecohidráulica ID. (a) Niveles de Superficie Libre, que determinan las profundidades en las celdas. (b) Distribuciones horizontales de velocidad media en las celdas centradas en las verticales hidrotopográficas.

3. Descripción del Método "LogD"

Se desarrollan varios algoritmos para la simulación de la velocidad media en celdas, denominados conjuntamente "LogD" ("Logarithmic Distribution"), que son aplicables en regímenes hidráulicos de tipo permanente, uniforme y turbulento sobre un lecho hidráulicamente rugoso. "LogD" utiliza la ley universal de distribución vertical de velocidades logarítmica de Prandtl-von Kármán (Chow, 1959) extendida a toda la columna de agua, para representar de forma predictiva la resistencia hidráulica en una celda.

En las condiciones anteriores, Cebeci y Smith (1974) identifican dos regiones en la corriente, cuyo límite se encuentra al 20% de la profundidad (Figura 3a): 1) la "interior" junto al lecho, con un gradiente de velocidad notable, y 2) la "exterior", ocupando el resto de la columna. Si bien el esquema de Prandtl-von Kármán es válido estrictamente en la región interior (Kironoto y Graf, 1995), varias experiencias respaldan su aplicación general en la región exterior (Kirkgöz, 1989; Montes, 1998). La función de Prandtl-von Kármán particularizada por Rotta (1962) para un régimen turbulento hidráulicamente rugoso es:

$$u = 5.75 \sqrt{g S h} \log \left(\frac{30 y}{k} \right) \quad (2)$$

donde (Fig. 3a) u = velocidad puntual (m/s) a una altura y (m); g = gravedad (m2/s); S = pendiente del lecho (m/m); h = profundidad (m); k = rugosidad absoluta del lecho (m). La ecuación básica de "LogD" (Ec. 3) proviene de la integración de la ecuación (2) en toda la vertical (Dingman, 1971), y su extensión a la correspondiente celda computacional. Se trata por tanto de un modelo cuasi-2D de resistencia hidráulica de fricción, promediado en profundidad para predecir distribuciones horizontales de velocidad (Fig. 2b), de la forma:

$$U_i = 5.75 \sqrt{g S h_i} \left[\log \left(\frac{h_i}{k_i} \right) + 1.04 \right] \quad (3)$$

siendo U_i = velocidad media en la celda (m/s); y k_i = rugosidad efectiva de la celda (m). La calibración deduce la rugosidad efectiva de cada celda (k_i) a partir de la distribución de velocidad observada:

$$k_i = \text{ANTILOG} \left(\log h_i + 1.04 - \frac{U_i}{5.75 \sqrt{g h_i S}} \right) \quad (4)$$

donde ANTILOG = antilogaritmo (10^*). Cuando se desconozca la pendiente (S), podrá utilizarse cualquier valor razonable, y operar con un factor de fricción ficticio pero completamente válido. Las pautas ecohidráulicas de medición en celdas más profundas de 75 cm exigen el registro de dos velocidades puntuales, a unas distancias verticales de la superficie libre del 80% y 20%. La expresión ad hoc es:

$$k_i = \text{ANTILOG} \left(\log h_i - \frac{0.78 \varphi - 1.38}{1 - \varphi} \right) \quad (5)$$

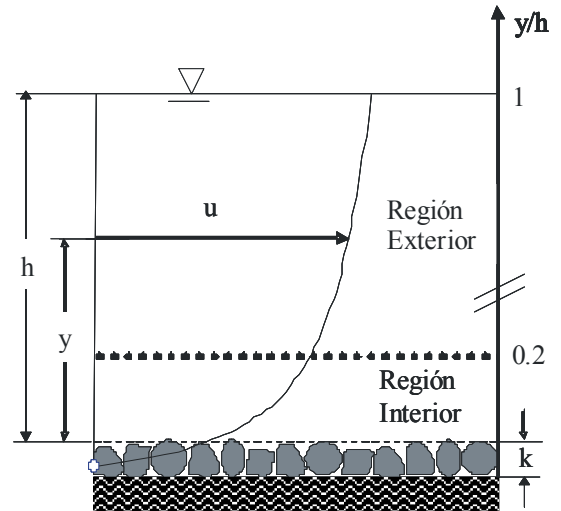
con φ = cociente entre ambas velocidades, respectivamente. La simulación de la velocidad media en una celda (U_i^{sim}) resuelve la ecuación básica de "LogD" (Ec. 3) para un caudal definido, utilizando una profundidad simulada (h_i^{sim}) deducida del NSL precalculado, expresado como:

$$U_i^{sim} = 5.75 \sqrt{g S h_i^{sim}} \left[\log \left(\frac{h_i^{sim}}{k_i^{sim}} \right) + 1.04 \right] \quad (6)$$

Finalmente, estas velocidades se multiplican por un Factor de Ajuste de la Velocidad (FAV) que conforma una distribución de velocidad más coherente con el flujo permanente modelado. En esencia, se trata de un algoritmo de reparto del previsible desajuste entre el caudal simulado (Q^{sim}) y el caudal agregado con las velocidades (U^{sim}) y las áreas (A_i) de todas las celdas:

$$FAV = \frac{\sum U_i^{sim} A_i}{Q^{sim}} \quad (7)$$

(a) Flujo Turbulento Rugoso



(b) Terminología "LogD"

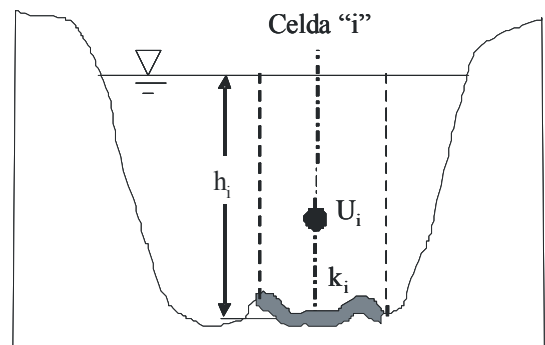


Figura 3. Fundamentos y aplicación del modelo "LogD". (a) Distribución vertical de velocidad logarítmica (Prandtl-von Kármán) y regiones en un flujo turbulento rugoso. (b) Esquema terminológico de "LogD" en una celda computacional.

4. Análisis de la Capacidad Predictiva del Modelo "LogD"

4.1. Metodología

"LogD" ha sido probado en un rango amplio de condiciones ecohidráulicas frecuentes en corrientes de gravas, que incluyen tres tipos básicos de hábitat (rápidos, tablas y remansos) y tramos fluviales de tres órdenes de magnitud (alta-pendiente, moderada-pendiente y baja-pendiente). Los datos hidrotopográficos utilizados pertenecen a un conjunto de 135 secciones transversales extraídas con autorización de distintas modelaciones PHABSIM en ríos Californianos (EE.UU.) elaboradas por la consultora TRPA & Associates (Arcata, California, EEUU). Este trabajo complementa el análisis previo más simple de Díez Hernández y Martínez de Azagra (2005) con un subconjunto de 36 secciones representativas de los mismos hábitats, pero en dos tipos de tramos fluviales (alta/baja pendiente).

Esta información seleccionada representa tres ambientes ecohidráulicos comunes (rápidos, tablas, y remansos) en ríos de gravas con tipología básica de pendiente (alta, media, y baja). La anchura de los cauces estudiados varía desde un mínimo de 5 m (rápidos alta-pendiente) hasta un máximo de 65 m (remansos baja-pendiente), y la profundidad máxima es aproximadamente 2.50 m. Los caudales medios interanuales de los tramos fluviales se encuentran en el intervalo de 1 m³/s a 48 m³/s.

El protocolo de caracterización fluvial siguió las directrices estipuladas para la ubicación de las secciones transversales y el levantamiento hidrotopográfico en estudios ecohidráulicos (Milhous et al., 1984; Bovee, 1997). La medición topográfica con nivel óptico y mira estableció un mínimo de 20 estaciones mojadas durante el caudal menor, normalmente equidistantes (50cm - 100 cm dependiendo del ancho), excepto cuando alguna particularidad morfodinámica importante precisó de puntos adicionales. El nivel de la superficie libre registrado promedia las mediciones en ambas orillas y en puntos suplementarios del cauce (mayor número cuanto más turbulento sea el flujo).

El procedimiento de aforo ha respetado las directrices referenciales establecidas por Rantz (1982). La velocidad media

en una vertical se determinó a partir de un número variable de mediciones puntuales, dependiendo de su profundidad (p): como la lectura al 60% del calado ($p < 75\text{cm}$); la media de los valores al 20% y 80% ($75\text{cm} < p < 120\text{cm}$); y promediando las tres mediciones anteriores con doble peso para la primera ($p > 120\text{cm}$). Se utilizaron molinetes hidráulicos mecánicos de eje vertical con copas, de los dos tamaños recomendados para estas condiciones por el USGS (United States Geological Survey; Rantz, 1982): micromolinete tipo "Pigmy" (Scientific Instruments 1205) para profundidades menores de 45 cm, y el estándar "Price AA" (Scientific Instruments 1210) para zonas más profundas. Las mediciones se realizaron durante 20 segundos en velocidades mayores de 0.60 m/s, y 40 segundos en caso contrario, siguiendo las pautas para este tipo de modelaciones (Bovee, 1997). El funcionamiento correcto de los molinetes se aseguró mediante las inspecciones, ajustes, y pruebas de giro efectuadas antes y durante el trabajo de campo. El error del tipo de molinete estándar es menor del 2% ($< 1\%$ con $v > 15\text{ cm/s}$) y el del micromolinete no alcanza el 5% ($< 1.8\%$ con $v > 15\text{ cm/s}$).

Para conseguir aforos confiables se verificó que la contribución de cada una de las múltiples celdas al caudal total era menor del 10% (preferiblemente $< 5\%$), conforme a los criterios de Harrelson et al. (1994) y Herschy (1995). La condición de flujo permanente durante el aforo fue comprobada mediante la revisión periódica de un limnómetro de campo colocado en cada sección. Todos los caudales fueron calculados en campo, y comparados con los registrados en secciones transversales adyacentes y en las estaciones de aforo durante el mismo flujo, con objeto de fijar la mejor estimación del caudal. Las secciones vadeables fueron levantadas utilizando un soporte para vadeo ("top-setting wading rod"), y las más profundas precisaron de una embarcación. En cada sección se registraron las distribuciones horizontales completas de velocidad correspondientes a tres caudales, los cuales abarcaban el rango hidrológico analizable y medible de modo seguro.

Concibiendo el hábitat fluvial como un área relativamente homogénea con una velocidad, profundidad y material del lecho característicos (Roussel y Bardonnet, 1997), se han clasificado como "rápidos" las zonas con control hidráulico de cauce, sin remanso, donde la superficie libre es prácticamente paralela al lecho y la corriente es agitada, somera ($< 30\text{ cm}$) y rápida (> 30

cm/s). Las "tablas" (o piscinas) 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 en ambientes lentificados (<30 cm/s) y profundos (>60 cm). De acuerdo con la tipología utilizada, el tramo de alta-pendiente representa cauces estrechos (5-10 m), con material grueso (bloques y roca) y pendiente elevada (>1%). El tramo de moderada-pendiente incluye cauces mayores (10-40 m), de granulometría intermedia (guijarros y gravas) y menor pendiente (<1%). En el tramo de baja-pendiente los cauces son amplios (40-65 m), con material más fino (gravas) y pendiente pequeña (<<1%). Para representar las combinaciones de los ambientes acuáticos anteriores, las secciones seleccionadas (135) fueron clasificadas en bloques de 15 unidades representativas de cada una de las 9 condiciones (3 hábitats x 3 tramos).

Se ha utilizado el software RHABSIM 3 en Español (Payne y Diez Hernández, 2004) para simular las distribuciones de velocidad ligadas a las tres descargas observadas, mediante el método convencional "I-vel" y el nuevo "LogD". Ambas formulaciones han sido calibradas con las mediciones realizadas durante cada uno de los caudales (bajo, medio y alto). 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 modelado. Agregando jerárquicamente los errores en cuatro niveles (caudal-celda-sección-hábitat) se han obtenido los Errores Relativos Medios (ERM) y los Errores Absolutos Medios (EAM), los cuales expresan el desatino de las predicciones en un hábitat determinado. El método "LogD" se ha validado mediante una comparación de estadísticos de tendencia central, complementada con un análisis de correlación lineal.

4.2. Resultados

La eficacia global del procedimiento "I-velocity" se refleja en la Tabla I, que muestra los Errores Relativos Medios (ERM) y los Errores Absolutos Medios (EAM) en cada hábitat básico de los tres tramos fluviales estudiados. Las respuestas mejores corresponden invariablemente a la configuración calibrada con el caudal Alto "I-vel [A]". Este hecho era esperable si se tiene en cuenta que el caudal superior minimiza el conocido problema de las nuevas celdas que se incorporan al flujo durante descargas mayores a la de calibración. Al carecer de rugosidades confiables deducidas de mediciones, esta franja perimetral genera normalmente unas velocidades incoherentes que son difícilmente ajustables. La comparación entre los diferentes tramos fluviales revela que la previsibilidad mejora a medida que disminuye la pendiente, si bien las diferencias son limitadas.

Tabla I. Errores Relativos Medios (ERM) y Errores Absolutos Medios (EAM) del modelo "I-velocity" en tres hábitats básicos (rápidos, tablas y remansos) de tres tipos tramos fluviales (alta/moderada/baja-pendiente). Se ensayan tres configuraciones calibradas con el caudal alto (I-vel[A]), con el medio (I-vel[M]), y con el bajo (I-vel[B]).

Método	ERM (%)			EAM (cm/s)		
	Rápidos	Tablas	Remansos	Rápidos	Tablas	Remansos
Tramo alta-pendiente						
1-vel [A]	26.51	27.17	29.98	5.01	7.15	9.02
1-vel [M]	31.61	29.87	43.85	6.02	7.69	10.03
1-vel [B]	38.48	41.88	54.72	7.54	8.65	11.21
Tramo media-pendiente						
1-vel [A]	21.71	23.15	26.48	4.10	6.94	8.33
1-vel [M]	22.09	23.85	26.85	4.25	7.03	8.69
1-vel [B]	22.11	21.45	27.10	4.06	6.74	8.21
Tramo baja-pendiente						
1-vel [A]	18.47	10.21	21.08	3.49	3.06	6.63
1-vel [M]	21.42	12.41	22.58	3.68	3.36	6.80
1-vel [B]	18.25	10.52	21.85	3.45	3.11	6.70

Con el objeto de validar "LogD" se han comparado las velocidades medias observadas y las simuladas en cada una de las celdas seleccionadas aleatoriamente dentro de las secciones representativas. La muestra contiene un conjunto de 150 celdas para cada hábitat (en torno al 25% del total), lo que supone 450 por tramo fluvial y 1350 totales. Para determinar en qué medida el algoritmo "LogD" (calibrado con el caudal superior) representa los campos de velocidad reales, se realizaron ajustes de regresión lineal entre los valores observados y los predichos, de forma independiente en cada ambiente hidráulico. A modo de ejemplo se muestra en la Figura 4 lo ocurrido en el tramo de baja-pendiente, con las respuestas en los tres hábitats. Los ajustes evidencian unas

relaciones estadísticamente significativas. El estadístico r^2 expresa el porcentaje de la variabilidad de la velocidad medida en un hábitat determinado que se explica linealmente mediante el esquema numérico "LogD".

El desempeño de "LogD" ha disminuido los errores de simulación de "I-vel" de modo consistente en todos los ambientes, aunque en una proporción limitada. La Figura 5 expone los porcentajes medios de reducción del Error Relativo Medio (ERM) conseguidos, los cuales varían del 3.1% al 5%. Por otra parte, las soluciones de "LogD" siguen el mismo patrón que "I-vel" en cuanto al incremento de la capacidad predictiva a medida que disminuye la pendiente del tramo.

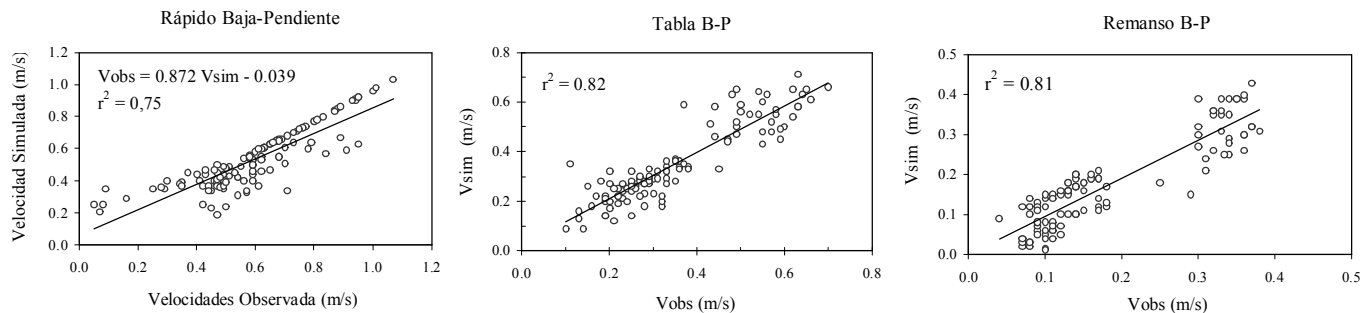


Figura 4. Relaciones entre la velocidad media en una celda observada y la modelada con la técnica "LogD" en un tramo de Baja-Pendiente (BP). Se presentan las respuestas en cada uno de los tres hábitats básicos estudiados (rápidos, tablas y remansos). A modo de ejemplo, se muestra la función en los rápidos. El coeficiente r^2 expresa el porcentaje de la variabilidad de la velocidad observada que se explica mediante "LogD".

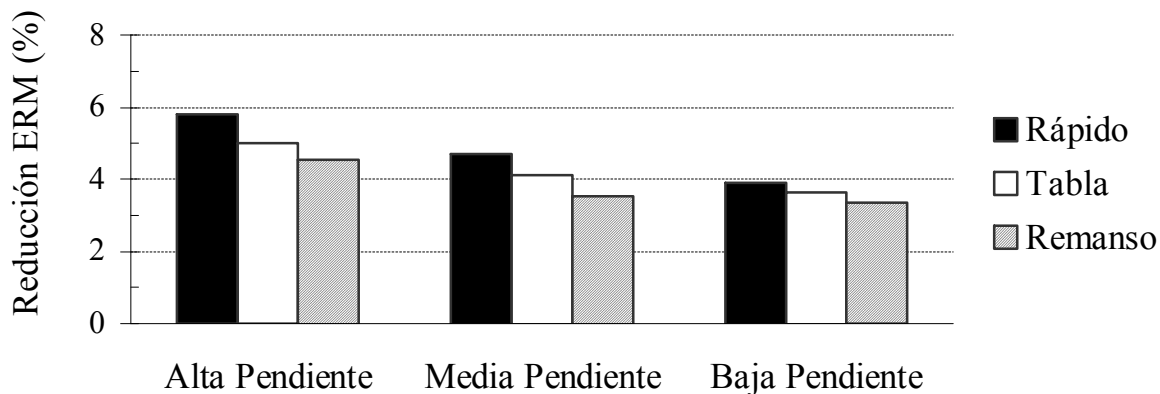


Figura 5. Reducción porcentual del Error Relativo Medio (ERM) originada con el método "LogD" respecto al "I-velocity", en los tipos básicos de hábitats y tramos fluviales analizados.

4.3. Discusión

El esquema predictivo de los campos de velocidad media con exactitud optimizada y dispersión mínima emplea tres distribuciones completas de velocidad, y calibra el algoritmo oportuno (I-vel/LogD) con cada una de ellas para simular los caudales intermedios en un intervalo definido. Esto es lógico, ya que este procedimiento minimiza en cada celda la diferencia entre la rugosidad con la que se calibra el modelo y la simulada para otro caudal, habida cuenta de la variación de la rugosidad con el caudal inherente en los ríos de gravas (Powell, 1998). En consecuencia, esta ejecución reduce también los errores de simulación que una celda provoca al resto en la compensación de conductividades ligada al ajuste de velocidades (FAV). Sin embargo, este enfoque presenta la dificultad de delimitar los rangos de simulación idóneos para cada caudal de calibración, lo cual menoscaba su utilidad práctica notablemente.

Según nuestros resultados, el error de la simulación con "I-vel" varía en términos relativos del 10% al 30% y entre los valores absolutos de 3.1 cm/s y 9.4 cm/s. Estos desatinos superan los encontrados en los estudios referenciales previos de tramos fluviales con tipología comparable. Las modelaciones de Bremm (1988) en un segmento de alta-pendiente (6%, ancho 8m, y módulo anual 0.15m³/s) y otro de baja-pendiente (< 1%, 50m, 71 m³/s) en California (EEUU), ambos representados mediante seis secciones transversales, incorporan errores medios en torno a los 3.5 cm/s. Nuestros hallazgos rebasan también el intervalo de inexactitud delimitado por Bartz (1990) en tres ríos de Colorado (EEUU) de distintos órdenes de magnitud en cuanto al módulo anual: pequeño (0.3 m³/s), mediano (3 m³/s) y grande (30 m³/s). Cada fragmento fluvial se simplifica mediante un número diferente de secciones (12, 18 y 21, respectivamente), las cuales se manejan conjuntamente sin distinción de tipología morfodinámica, produciendo errores del 10.6% al 13.8%. Además de las especificidades de los datos de campo de los trabajos anteriores (p.ej. geometría, rugosidad, ancho de celda), las discrepancias pueden deberse a la configuraciones particulares de los modelos, así como al procedimiento analítico de los campos de velocidad (tamaño de la franja examinada, agregación de errores individuales, etc).

La formulación de "I-vel" supone un flujo 1D permanente y uniforme estricto en todas las celdas, y simplifica la fórmula de Manning reemplazando el radio hidráulico de una celda por la profundidad de su vertical representativa. Esto facilita el cómputo de las conductividades individuales, y su agregación en las secciones (compuestas) durante el ajuste de velocidades con el FAV. Nuestro ensayo revela que este modo de cálculo aproximado del radio hidráulico exhibe muy poca imprecisión: los incrementos porcentuales del ERM han variado entre un mínimo del 1.30% y un máximo del 3.11%, de forma creciente a medida que el ambiente se lentifica y el gradiente disminuye. Estas diferencias estrechas eran esperables, debido a la distancia pequeña entre verticales consecutivas (normalmente menor de 50 cm y máxima de 150 cm) y al elevado número de celdas establecidas (más de veinte, con contribuciones individuales de caudal menores del 10%). La suposición del flujo 1D implica la inexistencia de esfuerzos cortantes entre celdas, por lo que el perímetro mojado de ellas se limita a la longitud del lecho (Yen y Overton, 1975). En consecuencia, en este caso las celdas computacionales pentagonales establecidas para el cálculo exacto del radio hidráulico se diferencian muy poco de las rectangulares concebidas en la aproximación. En resumen, juzgamos conveniente la utilización del algoritmo de cálculo estricto del radio hidráulico en la modelación de velocidades, puesto que incorpora menor incertidumbre sin complicar el procesamiento computacional significativamente.

En las aplicaciones PHABSIM no debe perderse de vista que las velocidades simuladas no tienen sentido en sí mismas, sino solamente como variables imprescindibles para calcular un Índice que evalúa el Hábitat acuático (IH). En consecuencia, el incremento del error al emplear una sola distribución de velocidad debe ser sopesado, considerando el ahorro notable de recursos y su efecto reducido en la confiabilidad de las relaciones hábitat-caudal. Esta idea aportada por Payne y Bremm (2003) se infiere de su análisis de curvas hábitat-caudal generadas con tres distribuciones de velocidad medidas y sólo con una, con datos de 90 estudios PHABSIM que abarcan un rango amplio de criterios de preferencia: las diferencias entre ambas respuestas en términos de IH fueron menores del 4% y en varios casos del 1%. Las investigaciones de Díez Hernández (2004) y Díez Hernández y Martínez de Azagra (2005) en tres hábitats (rápidos, tablas y remansos) de dos tramos fluviales (alta y baja-pendiente) con criterios biológicos análogos,

corroborar la recomendación anterior al encontrar unas divergencias normalmente menores del 5% en todo el rango de simulación.

Por consiguiente, la información anterior demuestra que "LogD" calibrado con una distribución horizontal completa de velocidad resulta conveniente para las modelaciones PHABSIM que persigan un balance costo-confiabilidad optimizado. Los resultados obtenidos aconsejan inequívocamente calibrar "LogD" con las velocidades ligadas al mayor caudal medible de manera segura. De este modo se maximiza el número de celdas mojadas cuyas rugosidades efectivas pueden ser deducidas de manera fiable a partir de velocidades observadas. En consecuencia, minimiza el perímetro mojado que se incorpora al flujo con caudales superiores al observado, conformado por celdas difícilmente modelables por su cumplimiento limitado del flujo ID y por el modo inconsistente de determinar sus rugosidades.

A tenor de los porcentajes de reducción del error conseguidos por el modelo "LogD", los cuales varían dependiendo del tipo de hábitat del 3.4% al 5.8% (ver Fig. 5), consideramos que se trata de una técnica sencilla y aplicable para modelar las velocidades en PHABSIM. Estas imprecisiones varían en un rango próximo al de la exactitud referencial de los molinetes hidráulicos mecánicos utilizados en ríos (Fulford et al., 1994) y no es raro que sean superadas por el error conjunto de medición de velocidad en este tipo de corrientes (Sanford, 1984). La competitividad de "LogD" respecto a su homólogo "I-vel" se explica, a nuestro juicio, por la siguiente razón. La simplificación de "LogD" al extender el flujo promediado en una vertical a su celda respectiva resulta más consistente conceptualmente con el contexto ID que la solución de "I-vel", la cual aplica en celdas pequeñas un modelo empírico concebido para secciones. De hecho, Dingman y Sharma (1997) encuentran que la eficacia de la ecuación de Prandtl von-Kármán integrada para una sección es equiparable a la de los enfoques clásicos de Manning y de Henderson (1966), en una muestra de 68 caudales analizados en ríos de Nueva Zelanda y EE.UU. La mejora detectada de la predictibilidad ligada a la disminución de la pendiente, entendemos se debe a un mayor ancho de las secciones transversales ubicadas en tramos de menor gradiente. En estos ambientes existe una proporción mayor de celdas ajenas a la fricción de las orillas, por lo que su funcionamiento hidráulico es más coherente con el flujo ID asumido.

La formulación actual de la técnica "LogD" es aplicable en un rango amplio de condiciones hidráulicas, que incluye los dominios modelados normalmente en la Ecohidráulica. Sin embargo, posee varias limitaciones determinadas por el tipo de flujo y las características hidráulicas del contorno. En primer lugar, se precisa un régimen ID permanente y uniforme, para que la particularización de las ecuaciones del movimiento (Reynolds y continuidad) determine en todas las celdas un esfuerzo cortante sobre el lecho proporcional a una pendiente longitudinal común y coincidente con la de la sección transversal. Además, es imprescindible un flujo turbulento para poder suponer que el esfuerzo cortante total sea equiparable al esfuerzo turbulento, que es el fundamento de la ecuación de Prandtl. En segundo lugar, para que la ecuación básica (Ec.3) tenga solución, se deduce que la profundidad de una celda debe superar el 9% de su altura de rugosidad, requisito laxo que se cumple masivamente en la simulación de flujos hidráulicamente rugosos en corrientes naturales.

Algunas simplificaciones en el desarrollo de "LogD" pueden provocar errores apreciables en ciertas condiciones. Por ejemplo, el término de profundidad incluido en la Ecuación 2 ("y") se refiere a la distancia vertical desde un punto de la vertical hasta el nivel donde la velocidad es nula, localizado a una distancia muy pequeña bajo la cresta de los materiales y variable con su granulometría (Kirkgöz, 1989; Graf y Altinakar, 1998). No obstante, si se tienen en cuenta los errores de medición en campo normales, parece aceptable utilizar con "LogD" unas profundidades medidas hasta la cresta de los elementos. Por otra parte, los guarismos de la ecuación anterior consisten en unos valores promedio, que varían en el rango de 15% dependiendo de la rugosidad del lecho (Graf y Kironoto, 1994).

Un aspecto importante es el supuesto cumplimiento de la ley logarítmica de velocidades en toda la columna de agua. Aunque estrictamente sólo es válida en la región interior, varios investigadores respaldan su aplicabilidad también en la región exterior, con errores pequeños y generalmente admisibles (Ferro y Giordano, 1991; Graf y Altinakar, 1998). Por ejemplo, Montes (1998) encuentra un error al aplicar la distribución de Prandtl von-Kármán en toda la profundidad de flujo del orden de 1.5 veces la velocidad de corte $[(g \cdot S \cdot h)^{0.5}]$ en la región exterior y prácticamente despreciable en la región interior. No es por tanto

extraño que algunos investigadores (Dingman, 1989; Beebee, 1996) destaquen discrepancias perceptibles entre la velocidad media en una vertical calculada estandarizadamente a partir de mediciones puntuales (p.ej. 60% de la profundidad) y el valor promediado verticalmente en la función logarítmica, circunstancia que se intensifica con la complejidad del flujo. Este efecto ha sido evaluado por Kondolf et al. (2000) como una sobrestimación en torno al 6% y subestimaciones generalmente menores, en un arroyo de pendiente moderada con flujo tranquilo.

5. Conclusiones

Se plantea un método hidráulico complementario unidimensional para modelar los campos de velocidad, que demuestra una capacidad competitiva respecto al algoritmo convencional integrado en PHABSIM. Este esquema de solución denominado "LogD" se fundamenta en la conocida ley de distribución vertical de velocidad de Prandtl-von Kármán, y modela la velocidad media en una celda bajo un flujo permanente, uniforme y turbulento sobre lecho hidráulicamente rugoso. En los ríos estudiados, el algoritmo "LogD" posee una capacidad predictiva comparable a la del modelo homólogo "I-velocity", y se incrementa con el número de velocidades observadas que se incorporen.

La formulación actual del nuevo sistema de solución complementario "LogD" incluye varias restricciones relevantes, como son: 1) la existencia de un flujo 1D estricto en todas las celdas; 2) la validez de la función logarítmica en toda la profundidad del flujo; y 3) la constancia de los coeficientes de una ecuación resultante de una integración vertical espacialmente simplificada. Aunque las inexactitudes provocadas por el incumplimiento de las hipótesis anteriores en los flujos estudiados (1D permanentes y uniformes hidráulicamente rugosos estudiados) no parecen críticas, pensamos que su trascendencia efectiva en una simulación ecohidráulica concreta dependerá de la precisión buscada. En consecuencia, consideramos que "LogD" es perfeccionable y debe ensayarse en más ríos, para contrastar este dictamen inicial.

Agradecimientos

La empresa consultora Thomas R. Payne & Associates (Arcata, California, EEUU) ha prestado un soporte técnico valioso en la selección de la información hidrotopográfica base y su procesamiento informático mediante el paquete RHABSIM. El soporte financiero vital proviene de la Universidad de Valladolid (España), mediante una beca de movilidad internacional para investigación (EEUU).

Referencias

- Bartz, B., 1990. Sources of uncertainty and effect on interpretation of results in the development of instream flows for fisheries habitat. M.Sc. Thesis, Utah State University. Logan, Utah.
- Bevee, J.T., 1996. Fluid speed variability and the importance to managing fish habitat in rivers. *Regulated Rivers: Research and Management* 12, pp. 63-79.
- 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. 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.
- 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., Lamb, B.L., Bartholow, J.M., Stalnaker, C.B., Taylor, J. y Henriksen, J., 1998. Stream habitat analysis using the Instream Flow Incremental Methodology. Information and Technology Report USGS/BRD/ITR-1998-0004, U.S.G.S.
- Bremm, D.J., 1988. Comparison of stream velocity simulations for the IFG4 model three-flow, one-flow, and no-velocity options. M.Sc. Thesis, Humboldt State University. Arcata, California.

- Cebeci, R. y Smith, A.M., 1974. Analysis of turbulent boundary layers. New York: Academic Press.
- Chow, V.T., 1959. Open-channel hydraulics. New York: MacGraw-Hill.
- Diez Hernández, J.M., 2003. Análisis Comparativo de los Métodos de Simulación Hidráulica de PHABSIM, y su influencia en la evaluación del hábitat fluvial, con propuesta de nuevos modelos hidráulicos en una dimensión. Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid, Valladolid, España.
- Diez Hernández, J.M., 2004. The Influence of 1D Hydraulic Simulation on the PHABSIM Habitat Index. Proceedings Fifth International Symposium on Ecohydraulics (in CD), september 12-17, Madrid, Spain.
- Diez Hernández, J.M. y Martínez de Azagra A., 2005. Complementary Hydraulic Technique For One-dimensional Ecohydraulic Modeling in Fluvial Habitat Restoration Studies. World Conference on Ecological Restoration, Zaragoza, España.
- Diez Hernández, J.M. y Ruiz Cobo, D.H., 2007. Determinación de caudales ambientales confiables en Colombia: el ejemplo del Río Palacé (Cauca). *Gestión y Ambiente* 10 (1), pp. 153-166.
- Dingman, S.L., 1971. Fluvial Hydrology. W.H. Freeman and Company. New York.
- Dingman, S.L., 1989. Probability distribution of velocity in natural channel cross sections. *Water Resources Research* 25, pp. 508-518.
- Dingman, S.L. y Sharma, K.P., 1997. Statistical development and validation of discharge equations for natural channels. *Journal of Hydrology* 199, pp. 13-35
- Ferro, V. y Giordano, G., 1991. Experimental Study of Flow Resistance in Gravel-Bed Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE* Vol. 117 (10), pp. 1239-1245.
- Fulford, J.M., Thibodeaux, K.G. y Kaehrle, W.R., 1994. Comparison of current meters used for stream gaging. Proceedings of the ASCE Symposium. ASCE (Ed.) 0-7844-0036-9. Buffalo, New York.
- Graf, W.H. y Kironoto, B.A., 1994. Turbulence characteristics in Rough Uniform Open Channel Flow. Proceedings Institution of Civil Engineers, Water, Maritime & Energy 106, pp. 333-344.
- Graf, W.H. y Altinakar, M.S., 1998. Fluvial Hydraulics: flow and transport processes in channels of simple geometry. Chichester: Wiley & Sons.
- Harrelson, C.C., Rawlins, C.L., y Potyondy, J.P., 1994. Stream Channel Reference Sites: An Illustrated Guide to Field Technique. USDA Forest Service Report RM-245, Fort Collins, Colorado, EEUU.
- Henderson, F.M., 1966. Open Channel Flow. MacMillan Co. New York. 522 P.
- Hersch, R.W., 1995. Streamflow Measurement. Elsevier Applied Science Publishers Ltd. University Press. Cambridge, Reino Unido.
- Kirkgöz, M.S., 1989. Turbulent Velocity Profiles for Smooth and Rough Open Channel Flow. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE* 15 (11), pp. 1543-1560.
- Kironoto, B.A. y Graf, W.H., 1995. Turbulence Characteristics in Rough Uniform Open Channel Flow. Proceeding of the Institution Civil Engineers, Water Maritime & Energy 106, pp.333-344.
- Kondolf, G.M., Larsen E.W. y Williams, J.G., 2000. Measuring and Modeling the Hydraulic Environment for Assessing Instream Flows. *North American Journal of Fisheries Management* 20, pp. 1016-1028.
- Kirkgöz, M.A. 1989. Turbulent velocity profiles for smooth and rough open channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE* 15(11), pp. 1543-1560.
- Milhous, R.T., Wegner, D.L. y Waddle, T.J., 1984. User's Guide to the Physical Habitat Simulation System. FWS/OBS-81/43, U.S. Fish and Wildlife Service. Washington D.C.
- Montes, S., 1998. Hydraulics of open channel flow. Reston: ASCE Press.
- Payne, T.R. y Bremm, D.J., 2003. The influence of multiple velocity calibration sets on the phabsim habitat index. Proceedings of International IFIM user's workshop (CD), Fort Collins, Colorado.
- Payne, T.R. y Diez Hernández, J.M., 2004. Riverine Habitat Simulation Software: RHABSIM Spanish Version. Proceedings V International Symposium on Ecohydraulics, Madrid, España.
- Powell, D.M., 1998. Patterns and processes of sediment sorting in gravel-bed rivers. *Progress in Physical Geography* 22. pp. 1-32.
- Rantz, S.E., 1982. Measurement and computation of streamflow: Volume I. Measurements of stage and discharge. United States

Geological Survey Water Supply Paper, 2175 P.

Rotta, J., 1962. Turbulent boundary layers in incompressible flow. Prog. In Aeronautical Sci., 2, pp. 1-219.

Roussel, J. M. y Bardounet, 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, pp. 573-588.

Sanford, R.A., 1984. PHABSIM error análisis: techniques and case studies. Tesis Master, University of Washington. Seattle, Washington.

Waddle, T.J. (ed.), 2001. PHABSIM for Windows: User´s manual and exercises. Fort Collins: U.S. Geological Survey. USGS Open-File Report 01-340.

Yen, C.L. y Overton, D.E., 1975. Shape Effects on Resistance in Flood-Plain Channels. Journal of the Hydraulics Division-ASCE 101 (HY7).

