

# Estimación de caudales óptimos y mínimos para el uso del Raft en el Alto Tajo

## ■ LUIS RUIZ JIMÉNEZ

Licenciado en Educación Física y Deportes

## ■ DIEGO GARCÍA DE JALÓN

Doctor Ingeniero de Montes.  
Escuela de Ingenieros de Montes.  
Universidad Politécnica de Madrid

## ■ Palabras clave

*Piragüismo, Rafting, Caudales mínimos, IFIM simulación hidráulica, Potencial de rafting, Caudales recreativos*

## Resumen

La creciente demanda de usos recreativos en los ríos y en especial de las actividades náuticas, tanto competitivas como de turismo activo, exige una respuesta razonada en cuanto a las necesidades de caudales circulantes por los ríos. Las Confederaciones Hidrográficas como gestoras del recurso "agua" deben coordinar las diferentes demandas del uso de este recurso en base a unas exigencias razonadas de los diferentes usuarios. En este trabajo presentamos por primera vez en España una metodología adaptada a las necesidades de este tipo de usos recreativos.

Esta metodología se basa en la estimación de unos parámetros de uso que evalúan las capacidades de los cauces de los ríos, aplicando un programa informático que nos permite calcular caudales óptimos y mínimos para el uso recreativo por simulación de las condiciones hidráulicas del cauce bajo el supuesto de diferentes caudales circulantes por el mismo.

## Introducción

El río Tajo aguas abajo de su confluencia con el río Gallo se transforma en una importante arteria fluvial en cuanto a la cantidad de caudal que lleva circulando por su cauce, y al mismo tiempo, conserva una pendiente alta, lo que le convierte en un excelente río para la práctica del piragüismo y raft.

La creciente importancia de la navegación recreativa por ríos es una demanda de la sociedad actual. Whittaker y colaboradores (1993) han estudiado el significado que tienen estas actividades y cómo se valoran sus diferentes aspectos. En un país donde los recursos hidráulicos son escasos y la competencia por el uso del agua es grande, es necesario justificar la solicitud de caudales circulando por los ríos para su uso recreativo. La gran experiencia sobre estos problemas en Estados Unidos y su encaje legal han sido considerados por Shelby y colaboradores (1991). Con el análisis de las curvas obtenidas por este método, se aporta una vía de conocimiento, sobre cuál es el caudal adecuado para las diferentes posibilidades de uso recreativo según nos refleja los trabajos en el río Dolores realizados por Shelby y Whittaker (1995).

La descripción de los parámetros analizados, relacionados con diferentes usos, nos facilitará una escala de uso que va desde caudales inaceptable, mínimo aceptable a óptimo. A esta conclusión llegaron en sus estudios sobre los efectos del caudal sobre los excursionistas en el Parque Nacional de Zion, Utah realizado por Shelby, y colaboradores (1996).

Los caudales para la pesca y la conservación de las especies han recibido considerable atención, y los procedimientos para determinar los caudales mínimos están generalmente bien establecidos y siempre son reconocidos en USA. Por lo general los caudales mínimos para peces y conservación de las especies son a menudo suficientes para la práctica del piragüismo de recreo, aunque los métodos para determinar los caudales apropiados no han sido bien establecidos (Shelby and Jackson, 1991).

En las áreas donde los caudales pueden ser controlados por presas los estudios de simulación nos dan un valor muy aproximado de las relaciones entre caudales y aprovechamiento recreativo, quedando patentes en algunos estudios realizados en el Río Colorado a la altura del Gran Cañón (Shelby y Brown, 1992). Este método de simulación nos facilita la posibilidad de asignar diferentes caudales controlados desde la presa y alternándolo según las necesidades requeridas como lo demostraron en el Río Umpqua en Oregón (Shelby, Whittaker y J. Roppe, 1998).

## Metodología

Para este análisis se ha utilizado la misma metodología que la utilizada en la estimación de los caudales ecológicos, mediante

## ■ Abstract

*The growing demand for the recreative use of rivers and specially water sports, be they competition or active tourism, calls for a reasoned reply geared to the necessities of river waterways. The Hydrographical Confederations, as managers of the recourse "water" ought to co-ordinate the different demands for the use of this recourse from a base of reasonable requests of the different users. In this work we present for the first time in Spain a methodology adapted to the necessities of this type of recreative uses. This methodology is based in the estimation of some dimensions of use that evaluate the capacities of the flow of the rivers, applying an informatic programme that allows us to calculate the optimal and minimal flows for recreative use by simulation of the 2 hydraulic conditions of the course under the supposed different circulating flows of the same.*

## ■ Key words

*Canoeing, Rafting, Minimum flows, IFIM Hydraulic simulation, Rafting potential, Recreative flows*



la simulación del hábitat físico, con la única diferencia consistente en utilizar los requerimientos mínimos y óptimos de la navegación con “rafting” en vez de las exigencias de hábitat de los peces que viven en sus aguas. Estos requerimientos los hemos, también expresado en forma de “curvas de preferencia” del rafting, que se exponen en la *figura 1*. Solo hemos empleado los requerimientos respecto a velocidad del agua y a calado, ya que el substrato del fondo entendemos que es indiferente para dicha navegación

De manera análoga al “Hábitat Potencial Útil” hemos definido el concepto de “Potencial de Rafting” como la suma de los productos de la superficie de cada celda de cálculo, por el correspondiente coeficiente de conformidad. Cada caudal circulante por el cauce determina las condiciones de velocidad y calado de cada celda, que a su vez, fijan el valor de su coeficiente de conformidad atendiendo a las curvas de preferencia del rafting.

Con esta metodología se dispone de una herramienta de trabajo que permite abordar cualquier problema relacionado con un curso de agua, planteando un conjunto de variables y la forma en que se ven afectadas por los usos que se dan a las aguas.

En este estudio nos basaremos en el método IFIM-PHABSIM, con algunas modificaciones, por ser el que integra el mayor número de datos a la vez: hidrológicos, geomorfológicos y biológicos; completándolo en lo que se refiere a la caracterización del río y específicamente a los requisitos de hábitat de los usos recreativos.

El método IFIM (Instream Flow Incremental Methodology; PHABSIM, Physical Habitat Simulation) Bovee (1978) se fundamenta en la caracterización del hábitat con el fin de ver, a través de unas curvas que representan el comportamiento de la fauna acuática, cual es el uso de ese hábitat por una especie o conjunto de especies. Fleckinger trata de llevar a cabo la caracterización del curso de agua mediante un estudio de las profundidades y velocidades de un tramo, de tal manera que determina el caudal mínimo como aquel que permite una adecuada repartición en el tramo de las distintas zonas de remanso y corriente.

Esta metodología trata de conocer cual es la estructura real del cauce del río (que podría asemejarse al canal de un curso artificial de agua), para, conocido el caudal que en cada momento lo atraviesa, poder estudiar una variable o conjunto de variables de la corriente.

Para ello se lleva a cabo una caracterización del cauce como una estructura independiente del régimen de caudales. Conocida ésta, puede hacerse un estudio de simulación hidráulica para ver como se modifica el sistema de variables que intervienen sobre el río como ecosistema, elemento del paisaje o en su capacidad recreativa.

En nuestro caso hemos seleccionado un tramo de río para aplicar esta metodología, localizado aguas debajo de la Central Eléctrica de Azañón (Guadalajara) cuyas coordenadas UTM son 30t 0538499 y 4506340.

### Simulación hidráulica

El programa de ordenador que hemos utilizado es el **RIVER-2D**, desarrollado por Peter Steffler (1998) en la Universidad de Alberta, Canadá, permite la simulación hidráulica seleccionando los caudales que resulten más apropiados para cada caso. El **RIVER-2D** es un programa que incorpora la metodología IFIM, a un modelo hidráulico de simulación en dos dimensiones. Dicha simulación se basa en los principios de conservación de la masa y de los momentos, y en una serie de leyes físicas que relacionan las fuerzas de control y de resistencias con las propiedades de los fluidos en movimiento. La solución de las ecuaciones que gobiernan el movimiento, se alcanza mediante un análisis de elementos finitos discreto que reduce a un número finito de ecuaciones en un número finito de puntos de la red espacio-temporal. De esta manera el álgebra se reduce a la aritmética, que puede ser traducida a código de ordenador.

Las condiciones de contorno con las que se ajusta el modelo hidráulico del **RIVER-2D** se basan en la altura y el caudal en la sección de entrada y de la altura de agua en la sección de salida o de aguas abajo. En especial, es necesario obtener una relación entre el caudal circulante

(por unidad de anchura) y la altura del agua a la salida del tramo, que normalmente se obtiene empíricamente aforando a diferentes niveles de agua. En nuestro caso hemos ajustado ecuación:

$$q = b \cdot d^{1,6666}$$

donde  $q$  es el caudal por unidad de anchura ( $m^2/s$ ),  $b$  es una constante que ajustamos en base a los datos de orilla y puntos con cota de la superficie del agua, y  $d$  es al altura del agua en un punto de la sección.

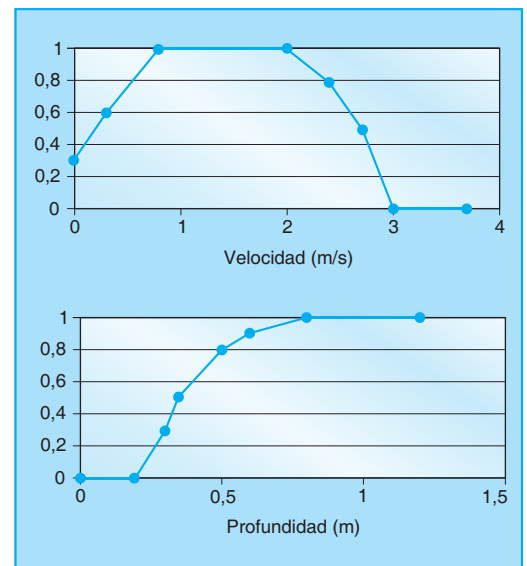
El coeficiente de rugosidad empleado se fija por las características granulométricas y morfológicas del lecho, y en el modelo **RIVER-2D** se evalúa a través del coeficiente de la “altura límite de rugosidad efectiva” ( $k_s$ ), ya que tiende a mantenerse constante en un espectro mas amplio de profundidades.

### Resultados

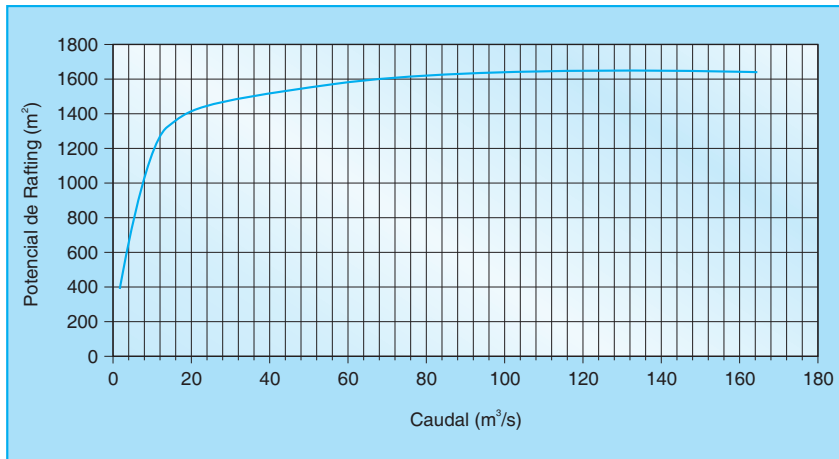
Simulando diferentes valores de caudal circulando por el tramo del río Tajo, se obtienen diferentes valores del Potencial de Rafting en cada punto del tramo, y por tanto distintas distribuciones del Potencial de Rafting en el río. Con objeto de po-

#### FIGURA 1.

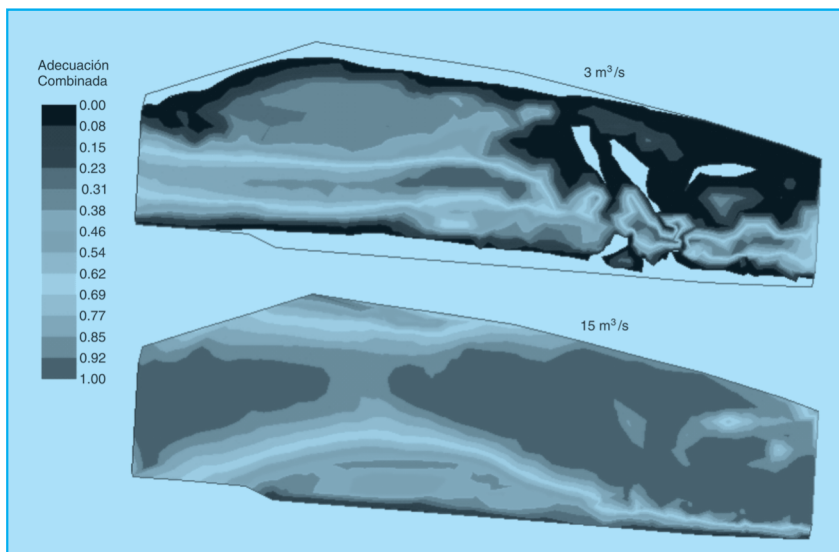
Curvas de preferencia propuestas para la actividad de rafting para velocidad del agua y profundidad.



■ FIGURA 2.  
Variación del Potencial de Rafting global con el caudal circulante por el tramo del Alto Tajo estudiado.



■ FIGURA 3.  
Mapa de distribución del Potencial de Rafting combinado (velocidad y profundidad) a lo largo del tramo del río Tajo estudiado, atendiendo a dos valores de caudal circulante.



der comparar las condiciones globales, para cada caudal circulante podemos sumar la Potencia de Rafting de todos los puntos. De esta manera obtenemos valores del Potencial de Rafting Global para cada caudal circulante, cuyo conjunto nos define una curva que se expone en la *figura 2*.

En dicha curva se representan simulaciones de caudal circulante entre 1 m<sup>3</sup>/s y 165 m<sup>3</sup>/s. Podemos observar que existe un cambio marcado de pendiente de la curva hacia los 15 m<sup>3</sup>/s, indicando que para valores de caudal circulante

por el cauce superiores la potencialidad del rafting no experimenta aumentos significativos. Mientras que con valores inferiores las disminuciones del dicho potencial son más drásticas.

El significado del Potencial de rafting con distintos caudales, afecta diferentemente según los puntos del tramo fluvial. A modo de ejemplo, en la *figura 3* se expone un mapa del cauce en donde se señala la distribución del Potencial de Rafting, con dos caudales extremos 3 y 15 m<sup>3</sup>/s. Obsérvese que aunque el río admita el descenso en rafting a caudales bajos, para que tenga un po-

tencial atractivo a los deportes de aventuras, el río ha de mantener una franja continua con características óptimas de rafting (>0,9) y suficiente ancha para el paso de la embarcación con holgura (>8 metros). En la figura vemos como con 15 m<sup>3</sup>/s tenemos una banda ancha de río (mas de 25 metros) con condiciones óptimas para el rafting (colores rojizos), mientras que con 5 m<sup>3</sup>/s esta banda es más estrecha (8 metros) y queda interrumpida varias veces en la mitad del tramo con un trecho de calidad inferior.

También nos interesa identificar los puntos problemáticos cuando el caudal circulante es escaso, así como los caudales mínimos necesarios para navegar sin realizar paradas por falta de calado. En la *figura 4* se representan los mapas de distribución del potencial de rafting atendiendo solo al criterio de calado, generados a partir de caudales circulantes pequeños: 1, 3 y 6 m<sup>3</sup>/s. En esta figura podemos observar que para un caudal de 1 m<sup>3</sup>/s la profundidad es inviable en tres puntos, dejando la banda rojiza interrumpida. Además dicha banda es muy estrecha por la constricción de islas laterales (blanco). Con 2 m<sup>3</sup>/s las obstrucciones se reducen a dos y con 6 m<sup>3</sup>/s se queda en uno solo.

## Conclusiones

Hemos visto cómo esta metodología de simulación del entorno fluvial aporta a los gestores, guías y palista ya sean expertos o principiantes una valoración objetiva de las condiciones de navegabilidad del río en momento real y su variación originada por las fluctuaciones de caudal.

Hay una considerable flexibilidad en el diseño y aplicación del IFIM. El efectivo uso del IFIM es una herramienta para evaluar y cuantificar los valores recreativos y requiere un buen conocimiento del proceso de cálculo del IFIM, el concepto del Potencial de uso recreativo, y de los requerimientos recreacionales y sus efectos dependientes del caudal circulante.

Este método incremental está basado en las siguiente hipótesis: a) profundidad y velocidad son las dos más importantes características para determinar la calidad del



valor recreativo; b) es posible determinar mínimo, máximo y óptima profundidad combinándolas con la velocidad y relacionándolas con las actividades recreativas, y c) el potencial recreativo o de uso esta expresado en términos ponderados de la superficie del río dotada con una cierta velocidad y determinada profundidad.

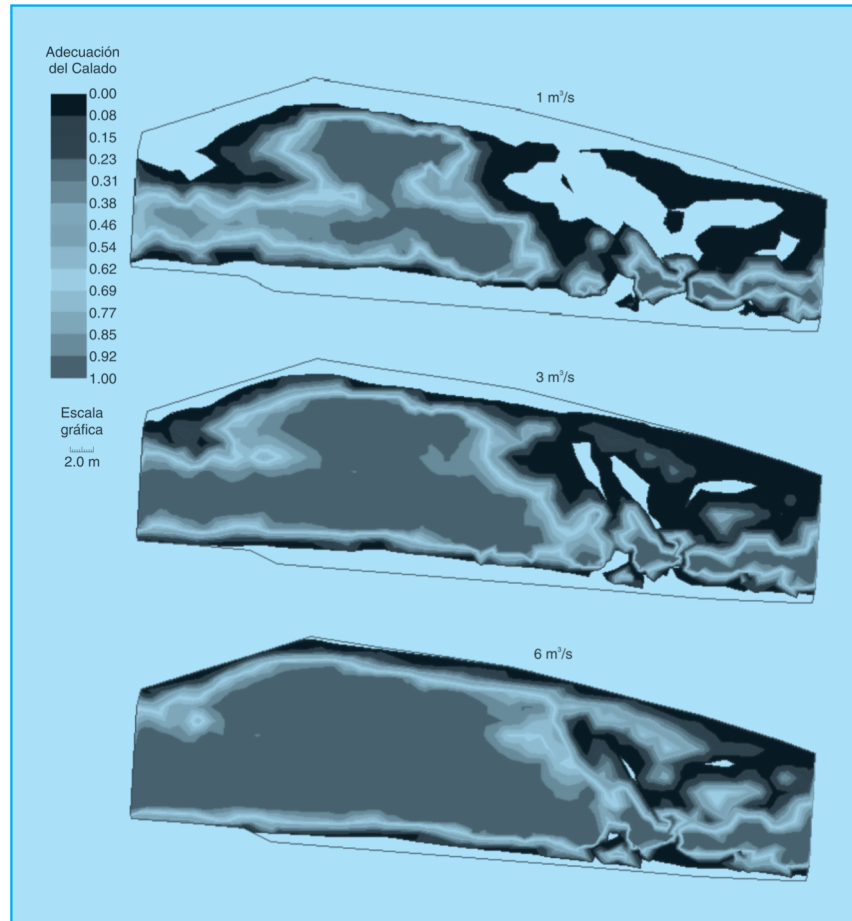
La ventaja de este modelo es repetible y cuantificable y podemos examinar zonas conflictivas o dudosas con relativa facilidad. Para terminar podemos concluir que en el tramo estudiado el rafting tiene mayor valor con caudales crecientes (al menos hasta 165 m<sup>3</sup>/s), y la actividad de rafting empieza a ser atractiva y emocionante a partir de los 15 m<sup>3</sup>/s con caudales circulantes. Sin embargo caudales superiores a 15 m<sup>3</sup>/s no producen aumentos significativos del Potencial de Rafting. Los caudales mínimos para poder navegar sin interrupciones ni paradas comienzan a partir de 6 m<sup>3</sup>/s.

## Bibliografía

- Bovee, K. D. (1982). *A Guide to Stream Habitat Analysis using the Instream Flow Incremental Methodology*. Instr. Flow Inf. Paper 12. USDI Fish and Wildl. Serv. Washington, 248 págs.
- Corbett, R. (1990). *A method for determining minimum Instream flow for recreational boating*. SAIC Special Report 1-239-91-01. McLean, V. A. (1991). *Science Applications International Corporation*.
- Shelby, B. y Vaske, J. (1991). Using normative data to develop evaluative standards for resource management: A comment on t
- Shelby, B.; Brown, T. y Taylor, J. (1992). *Stream flow and Recreation*. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. Fort Collins, Colorado 80526. General Technical Reporter RM-209 Revised. 26 págs.
- Shelby, B.; Whittaker, D. y Roppe, J. (1998). *Controlled Flow Studies for Recreation: A case Study on Oregon's North Umpqua River*. *Rivers* V6 N4, 259-268.
- Shelby, B. y Jackson, W. (1991). *Determining Minimum Boating Flows from Hydrologic Data River* (2), vol. 2, pp. 161-167.
- Shelby, B.; Brown, T. y Baumgartner, R. (1992, July). Effects of Stream flows on River Trip on

## FIGURA 4.

Mapas de distribución del Potencial de Rafting, atendiendo solo al parámetro profundidad, en el tramo estudiado aguas abajo de la Presa de la minicentral de Azañón (provincia de Guadalajara). C/ UTM 30T 0538499 y 4506340.



- the Colorado River in Grand Canyon, Arizona. *Rivers* V3 (3), 191-201.
- Shelby, B. y Whittaker, D. (1995). Flows and Recreation Quality on the Dolores River: Integrating Overall and Specific Evaluations. *River* V5 (2), 121-132.
- Shelby, B.; Whittaker, D. y Hansen, W. (1997, april). Stream flow Effects on Hiking in Zion National Park, Utah. *River Volume* 6 (2) 80-93.
- Steffler, P. (1998). *River 2D\_Bed*. Universidad de Alberta.
- Thomas, C. B.; Jonathan, G.; Taylor y Shelby, B. (1992). Assessing the effects of streamflow on recreation: A literature review. *Water Resources Bulletin* (6), vol. 27, december 1991.
- Whittaker, D.; Shelby, B.; Jackson, W. y Beschta, R. (1993). *Instream Flows for Recreation: A Handbook on Concepts and Research Methods*. U.S. Department of Interior National Park Service Rivers and Trails conservation Program. Cooperative Park Studies Unit Oregon State University. National Park Service Water resources Division, 103 págs.
- Whittaker, D. y Shelby, B. (2000). Managed Flow Regimes and Resources Values: Traditional versus Alternatives Strategies. *Rivers* V7 (3), 233-244.
- Williams, K. (1991). *Application of Instream flow quantifications to recreational river: a case study of the Cache La Poudre River, Colorado*. Fort Collins, CO: Colorado State University, Master's Thesis.