



IberHABITAT: evaluación de la Idoneidad del Hábitat Físico y del Hábitat Potencial Útil para peces. Aplicación en el río Eume

Marcos Sanz-Ramos, Ernest Bladé Castellet, Antoni Palau Ibars, Damià Vericat Querol & Anaïs Ramos-Fuertes

To cite this article: Marcos Sanz-Ramos, Ernest Bladé Castellet, Antoni Palau Ibars, Damià Vericat Querol & Anaïs Ramos-Fuertes (2019) IberHABITAT: evaluación de la Idoneidad del Hábitat Físico y del Hábitat Potencial Útil para peces. Aplicación en el río Eume, Ribagua, 6:2, 158-167, DOI: [10.1080/23863781.2019.1664273](https://doi.org/10.1080/23863781.2019.1664273)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/23863781.2019.1664273>



© 2019 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.



Published online: 26 Sep 2019.



[Submit your article to this journal](#)



Article views: 407



[View related articles](#)



[View Crossmark data](#)



Citing articles: 1 [View citing articles](#)

IberHABITAT: evaluación de la Idoneidad del Hábitat Físico y del Hábitat Potencial Útil para peces. Aplicación en el río Eume

Marcos Sanz-Ramos ^a, Ernest Bladé Castellet ^a, Antoni Palau Ibars ^b, Damià Vericat Querol ^b
and Anaïs Ramos-Fuertes ^a

^aInstitut Flumen, Universitat Politècnica de Catalunya - CIMNE, Barcelona, Spain; ^bGrupo de Dinámica Fluvial RIUS, Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl, Univeritat de Lleida, Lleida, Spain

RESUMEN

La caracterización y cuantificación del Hábitat Potencial Útil (HPU) para peces fluviales a partir de modelos de simulación hidráulica se ha basado tradicionalmente en la utilización de modelos hidráulicos unidimensionales, los cuales han sido técnicamente superados, aunque no con igual robustez ni expansión de uso, por modelos bidimensionales (2D). Por ello, se ha desarrollado un nuevo módulo en la herramienta de simulación hidráulica 2D Iber para evaluar la Idoneidad del Hábitat Físico (IHF), que a su vez es una variable básica para la estimación del HPU. El modelo se aplicó a un caso de estudio consistente en la evaluación del hábitat disponible para la trucha común (*Salmo trutta*), para sus tres estadios de desarrollo, en función de dos variables hidráulicas (calado y velocidad). El desarrollo del modelo ha permitido evaluar de manera directa la IHF y el HPU, así como obtener relaciones Caudal-HPU.

IberHABITAT: assessment of Physical Habitat Suitability and Weighted Usable Area for fishes. Application in the Eume River

ABSTRACT

The quantification and characterization of the Weighted Usable Area (WUA) for river fishes through hydraulic models has traditionally been based on the 1D hydraulic simulation approach, which has been technically surpassed, although not with equal robustness or breadth of use, by two-dimensional (2D) models. Therefore, a new module of the Iber 2D hydraulic model was developed as a tool to assess Physical Habitat Suitability (PHS), a basic variable for the estimation of the WUA. The new tool was applied to a case study to assess the physical available habitat for the brown trout (*Salmo trutta*) as a function of depth and water velocity. The development of the model allowed direct evaluation of fish habitat suitability and the WUA, as well as providing discharge-WUA relationships.

PALABRAS CLAVE

Hábitat físico; evaluación HPU peces; simulación 2D; Iber; gestión ambiental

KEYWORDS

WUA assessment; 2D simulation; Iber; environmental management

Introducción

En Europa, la entrada en vigor de la Directiva Marco del Agua, DMA [1], ha supuesto un cambio de paradigma en la gestión ambiental, ya que ha proporcionado un marco legal para la recuperación del Buen Estado Ecológico y la gestión ambiental de masas de agua, tanto continentales como costeras [2]. En particular, en ecosistemas fluviales, está sirviendo para evaluar el estado ecológico de ríos y para definir un Régimen de Caudales Ecológicos, RCE [2–5], en base a herramientas de caracterización del hábitat físico para peces [6]. Para ello, la metodología más utilizada es la propuesta por la *Instream Flow Incremental Methodology*, IFIM [7], que se basa en la combinación de modelos hidráulicos y modelos ecológicos para crear un modelo de hábitat o eco-hidráulico [8]. Ésta permite obtener

relaciones entre el Hábitat Potencial Útil (HPU) y el caudal circulante (Q). De este modo es posible analizar los efectos en la disponibilidad del hábitat físico que derivan de los cambios de caudal, así como la obtener posibles caudales óptimos que maximicen el hábitat para la especie analizada. En el caso de España, la Instrucción de Planificación Hidrológica, IPH [9], toma el modelo de hábitat como herramienta de ajuste de la distribución temporal y la suficiencia de caudales mínimos, siendo éstos estimados mediante métodos hidrológicos [10,11].

Los modelos de hábitat físico basados en modelos numéricos de simulación hidráulica están permitiendo evaluar las condiciones de habitabilidad para especies de peces en tramos extensos de río, incluso en ríos completos. Sin embargo, el carácter simplificado de los modelos numéricos [12], así como la incertidumbre asociada a los

CONTACT Marcos Sanz-Ramos  marcos.sanz-ramos@upc.edu  Institut Flumen, Universitat Politècnica de Catalunya - CIMNE, Barcelona, Spain

Other authors: ernest.blade@upc.edu, dvericat@macs.udl.cat, apalau@macs.udl.cat, anis.amos@upc.edu

© 2019 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

datos de entrada [13] (curvas de idoneidad, topografía, etc.), es un aspecto a tener en cuenta durante todo el proceso, incluido el análisis de resultados y la toma de decisiones en base a estos.

Desde el inicio de la eco-hidráulica se han empleado modelos de hábitat físico de carácter unidimensional (1D), aplicados a tramos cortos de ríos y en los que se pudiese trabajar con la información necesaria para desarrollarlos y validarlos. Modelos como RHYHABSIM [14] han sido, y siguen siendo, de amplio uso para la evaluación de la Idoneidad del Hábitat Físico (IHF) y del HPU ya que integran el modelo hidrodinámico y ecológico [6]. También existen modelos como HEC-RAS o Mike 11 que se limitan a la modelización hidráulica, siendo necesaria la extracción de información para combinarla con un modelo de ecológico independiente, y obtener así un modelo de hábitat. La principal limitación de modelos 1D reside en que las variables se evalúan en una sección y en una dirección [15]. Posteriormente, ya sea por el propio modelo o como un proceso post-cálculo, los resultados se interpolan entre secciones contiguas o se asumen constantes en la mitad del tramo entre secciones para cubrir toda la longitud del tramo de río estudiado. Esta metodología incrementa la incertidumbre de los resultados y puede inducir a error al tratar el tramo entre secciones con las mismas condiciones hidráulicas sin tener en cuenta la heterogeneidad morfológica e hidrodinámica (zonas de remanso, zonas de recirculación, saltos, pozas, cambios de régimen, etc.). En consecuencia se tiende a sobreestimar la variabilidad lateral y a subestimar la variabilidad longitudinal del lecho [16–18], y no se representa adecuadamente la hidrodinámica para geometrías de cauce complejas [6].

El desarrollo de modelos numéricos bidimensionales (2D) está permitiendo la simulación hidráulica con un alto grado de precisión en tramos de ríos, e incluso de ríos completos obviando las limitaciones de modelos 1D, siendo una evolución interesante y conveniente. Los modelos de evaluación del hábitat físico realizados *ad hoc*, como River2D [19], no incorporan las más recientes y extendidas técnicas de modelización numérica para la simulación del flujo en dos dimensiones [15,20]. El modelo hidráulico Iber [12], diseñado para dar respuesta a problemas de ingeniería hidráulica, fluvial y ambiental, se encuentra implementado en una interfaz amigable y con un flujo de trabajo ágil [21]. Su desarrollo, en base a técnicas numéricas avanzadas [12,22–24], permite la caracterización de flujos discontinuos (resaltos hidráulicos, frentes de onda, zonas de recirculación, etc.) y flujos complejos [25,26] evitando problemas de estabilidad [12].

En este contexto, se ha implementado un módulo hidrobiológico en el modelo numérico bidimensional

Iber, confiriéndole de esta manera las capacidades de un modelo de hábitat físico integral mediante el cual es posible conocer la distribución espacial y temporal de la IHF y del HPU. Se presenta su aplicación en un caso de estudio real en un tramo de río caracterizado por una notable regulación hidrológica y una compleja geomorfología (saltos, pozas, zonas de remanso, etc.). Los resultados obtenidos permitieron conocer la distribución espacial de la IHF de la trucha común (*Salmo trutta*) y las relaciones entre el hábitat físico y determinados caudales característicos (HPU-Caudal), así como las bondades que presenta el nuevo modelo en cuanto a flujo de trabajo, versatilidad y tiempos de cálculo.

Materiales y métodos

Metodología general para la determinación del HPU

La obtención de las relaciones HPU-Caudal está basada, conceptualmente, en la metodología IFIM, que se puede sintetizar en tres pasos (Figura 1).

Modelo hidrodinámico

El modelo hidrodinámico debe ser capaz de simular aquellas variables hidráulicas con significancia ecológica. Las variables más comúnmente aceptadas son el calado, la velocidad y el tipo de sustrato [7], pero existen otras variables como la turbulencia, la temperatura [27], la turbidez, etc., que también tienen relativa importancia.

Es necesario conocer, también, los datos disponibles (topografía, condiciones hidráulicas, etc.) o la posibilidad de obtenerlos con campañas de campo para alimentar y calibrar el modelo numérico. Cabe destacar que con la liberalización de datos geoespaciales (modelos digitales del terreno, vuelos LIDAR, etc.) se ha extendido el empleo de modelos numéricos frente a observaciones de campo.

Para la simulación hidráulica se pueden utilizar modelos 1D, 2D e incluso 3D. Las capacidades y limitaciones del modelo deben ser evaluadas, así como las ventajas e inconvenientes de cada tipo de simulación [6,15,16,28,29]. En la actualidad, la simulación hidráulica 2D está ampliamente extendida [28], aunque empieza a haber aplicaciones de modelos 3D en ríos [30–32], incluso para la evaluación del hábitat [33].

Modelo ecológico (criterios de preferencia ecológica)

El criterio más extendido para evaluar el hábitat físico para peces es la utilización de curvas de idoneidad o preferencia. Estas curvas son funciones de transformación

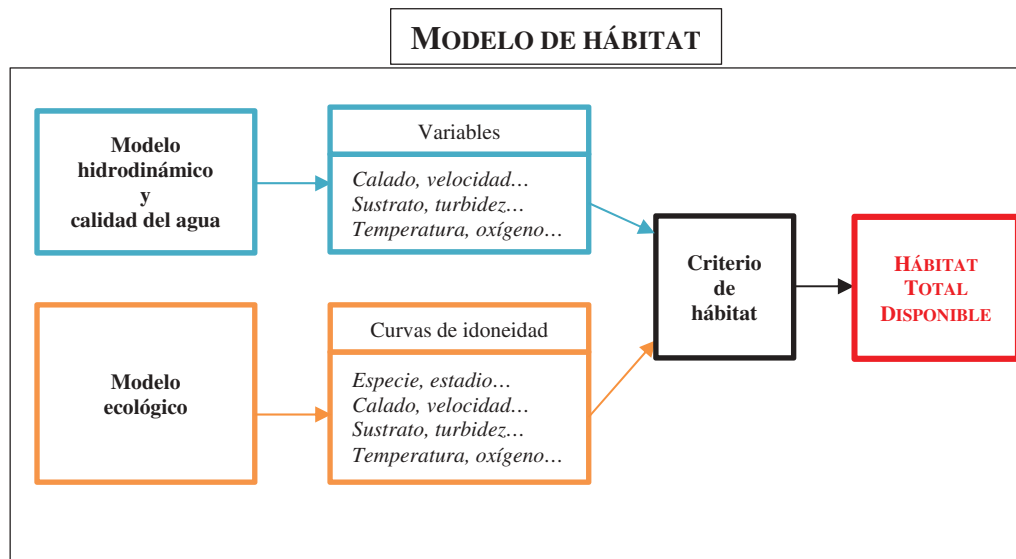


Figura 1. Esquema metodológico seguido para la obtención de la IHF y del HPU.

normalizadas que relacionan variables del medio fluvial con el uso que los peces hacen del espacio. Se obtienen mediante campañas de campo *ad hoc*, existiendo actualmente una extensa bibliografía al respecto [7,34–37]. Empero, en su uso se deben tener cuenta las limitaciones de las técnicas empleadas para su obtención [38], así como su aplicabilidad a tramos del río distintos al que se obtuvieron originariamente.

Habitualmente las variables de referencia hidráulicas son el calado y la velocidad, y a nivel geomorfológico el sustrato. Se pueden considerar, también, variables de calidad del agua (temperatura) o de la fisiografía del cauce (zonas de refugio). Las preferencias de hábitat se evalúan entre cero y uno, siendo valores cercanos a la unidad los correspondientes a un alto grado de idoneidad o adecuación y, por el contrario, un bajo grado de idoneidad para valores cercanos a cero. Cada especie, incluso cada estadio de desarrollo, cuenta con unas curvas de preferencia propias, descriptoras de sus requerimientos de hábitat en términos físicos.

Modelo de hábitat físico

El objetivo del modelo de hábitat es cruzar los resultados del modelo hidráulico con la información del modelo ecológico para obtener la IHF. Ésta se evalúa habitualmente como combinación de las diferentes idoneidades parciales de cada variable, o idoneidad elemental. Existen diversas maneras de evaluar la idoneidad elemental en función del criterio de hábitat:

- Suma de idoneidades $\left(\sum_{k=1}^n C_k\right)$
- Producto de idoneidades $\left(\prod_{k=1}^n C_k\right)$

- Media aritmética de idoneidades $\left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n C_k\right)$
- Media geométrica $\left(\sqrt[n]{\prod_{k=1}^n C_k}\right)$

siendo n el número de variables consideradas y C_k el valor de la idoneidad de la variable k evaluada. Resultan notorias las diferencias entre los distintos criterios de hábitat, por lo que la elección de uno u otro puede condicionar notablemente los resultados de hábitat físico de la especie evaluada.

El valor de la IHF se emplea como variable básica para la obtención del HPU, que se define como la superficie, o como porcentaje sobre el cauce inundado, que puede ser potencialmente utilizado por la especie o estadios de desarrollo evaluados. La evaluación hidráulica para diferentes caudales (Q) posibilita la obtención de relaciones HPU- Q .

IberHABITAT: obtención de la IHF y del HPU

El desarrollo del modelo de hábitat físico integral, denominado IberHABITAT, consistió en la creación de un nuevo módulo dentro de Iber capaz de evaluar la evolución espacial y temporal de la IHF y del HPU, así como diversas herramientas para su análisis y elementos para la toma de decisiones enfocadas, entre otras, a la determinación de un RCE.

IberHABITAT resuelve las ecuaciones de aguas poco profundas en dos dimensiones (modelo hidráulico) sobre una malla de volúmenes finitos [39–43] empleando el esquema numérico de Roe [42], e incorpora curvas de preferencia (modelo ecológico) de diferentes estadios de desarrollo (alevín, juvenil y adulto) de salmónidos y

ciprínidos para diferentes variables hidráulicas y geomorfológicas (velocidad, calado y sustrato). El modelo ha sido diseñado para estar completamente integrado con el resto de módulos de Iber, contemplando así la evaluación de variables de calidad del agua (temperatura, oxígeno disuelto, salinidad, etc.) [44] y transporte de sedimentos [45] en versiones futuras.

Para la obtención directa de relaciones HPU-Q según lo indicado en la IPH, se desarrolló la nueva herramienta «Caudal escalonado» que permite analizar distintos caudales, en régimen estacionario, en la misma simulación y modelo. Asimismo, se ampliaron las herramientas SIG integradas en la interfaz GiD [21] y se crearon ventanas amigables para escoger curvas de preferencia y/o introducir curvas de preferencia definidas por el usuario (Figura 2), todo ello con el fin de agilizar el proceso de construcción del modelo, entrada de datos y análisis de resultados. De este modo, es posible observar y analizar los resultados de distribución espacial y temporal de la IHF dentro del programa para la especie de pez o estadio de desarrollo indicados, así como obtener relaciones HPU-Q que pueden servir para proponer un RCE.

Aplicación del modelo IberHABITAT

Características del tramo de estudio

El tramo de estudio, de 3 km de longitud, se sitúa aguas abajo de la presa del Eume (Figura 3a), dentro del Parque Natural Fragas do Eume (Galicia, España). Al final de la zona de estudio se encuentra el Barranco de Teixido, un tributario de aportación variable (no supera los $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal ordinario) y que no se ha tenido en cuenta en el estudio.

El caudal circulante viene condicionado por la presencia de la presa del Eume. Gran parte del caudal es turbinado por la Central Hidroeléctrica del Eume (CH Eume), situada en el final del tramo de estudio, de manera que existe un tramo de río con caudales de mantenimiento. La aportación a pie de presa oscila entre los $0,1$ y $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ en función de la época del año.

Las características geomorfológicas y sedimentarias del cauce presentan una alta variabilidad. El cauce es muy angosto y la pendiente media supera el 5%. En el primer tercio predomina el lecho rocoso, con notable presencia de pozas y saltos de agua (Figura 3b). En el segundo tercio, la pendiente se reduce y el cauce se encuentra salpicado de bloques y cantos con un trazo más definido. En el tercio final, el río adquiere un cauce más estable, definido y continuo gracias a la reducción de la pendiente (Figura 3c). El ancho del cauce oscila entre 10 y 25 m, siendo más estrecho en el primer tercio.

Las buenas condiciones físico-químicas del río son fruto del buen estado de la calidad del agua del embalse. El tramo de río tiene un valor del IBMWP, *Iberian Bio-Monitoring Working Party* [46], de 172, lo que indica aguas no alteradas y condiciones hidromorfológicas adecuadas. La diversidad ecológica calculada en base al índice *Shannon-Weaver* [47] es de 3,36 bits, un valor moderado. La fauna íctica presente está compuesta por tres especies: la boga del Duero (*Pseudochondrostoma duriense*), el escaló (*Squalius carolitertii*) y la trucha común (*Salmo trutta*).

Criterio de hábitat

La trucha común (*Salmo trutta*) fue la especie objetivo para este estudio. Tras considerar que las variables hidráulicas de calado y velocidad eran descriptores

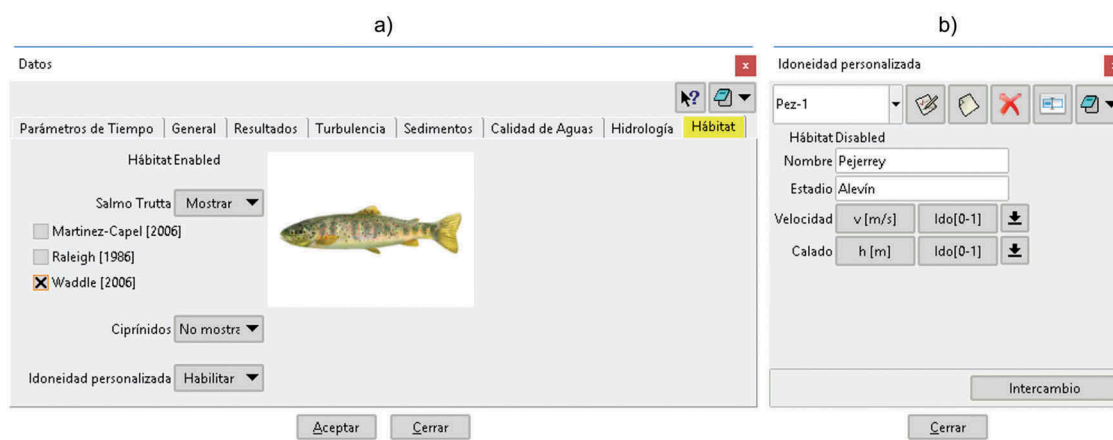


Figura 2. Interfaz gráfica del módulo de hábitat. Incluye una base de datos con curvas de idoneidad de diferentes autores, tanto salmónidos (*Salmo trutta*) y como ciprínidos (a), así como la posibilidad de incorporar curvas de idoneidad definidas por el usuario (b).

adecuados y suficientes para los objetivos del estudio, se prescindió del uso de la variable sustrato. Se emplearon las curvas de idoneidad (Figura 4) para el calado (C_h) y para la velocidad (C_v) extraídas de [34], y se utilizó el producto de idoneidades parciales como criterio de hábitat.

Modelo numérico

Caudales evaluados

Se analizaron 12 caudales: uno proveniente de una campaña de campo ($0,620 \text{ m}^3/\text{s}$), dos obtenidos del Anexo IV del Plan Hidrológico Galicia-Costa 2015-2021 ($1,567$ y $3,350 \text{ m}^3/\text{s}$), seis que se derivan del anterior plan hidrológico y de su interpretación para la definición del HPU ($0,149$; $0,328$; $0,829$; $1,141$; $1,515$ y $2,176 \text{ m}^3/\text{s}$), uno del cálculo del caudal medio del río en régimen natural ($11,770 \text{ m}^3/\text{s}$) y dos a propuesta para el presente estudio ($0,560$ y $1,200 \text{ m}^3/\text{s}$).

Topografía y malla de cálculo

Se utilizó un Modelo Digital del Terreno (MDT) con una resolución de 5×5 metros procedente del Instituto Geográfico Nacional. Para poder representar la heterogeneidad del tramo de río (saltos, pozas, meandros, etc.), se empleó un tamaño de malla ligeramente inferior al del MDT. La discretización espacial se llevó a cabo mediante una malla irregular de elementos triangulares de tamaño variable (de $1,36$ a $6,48 \text{ m}$), con un valor medio de 3 metros (longitud de la arista). El número de elementos del modelo resultó superior a 72.000 (Figura 5).

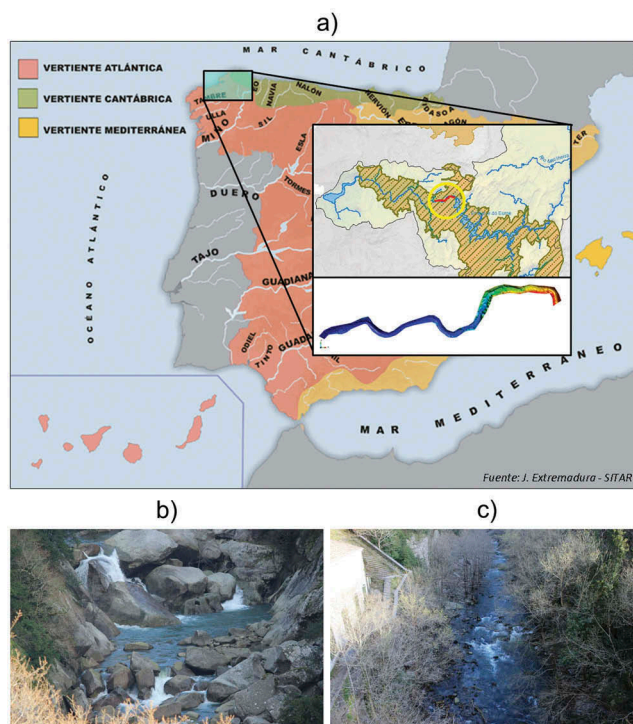


Figura 3. Ubicación de la zona de estudio (a) y fotografías de las facies geomorfológicas: cauce discontinuo con saltos y pozas (b) y cauce continuo (c).

Condiciones hidráulicas

Los caudales simulados se impusieron desde el pie de presa, en régimen subcrítico. El estudio finaliza con una condición de salida en régimen crítico lo suficientemente alejada para no interferir en el régimen hidráulico del resto del tramo. El puente situado justo aguas arriba de la CH Eume no interacciona con el flujo, por lo que no se incluyó en el modelo. Tampoco así el caudal turbinado

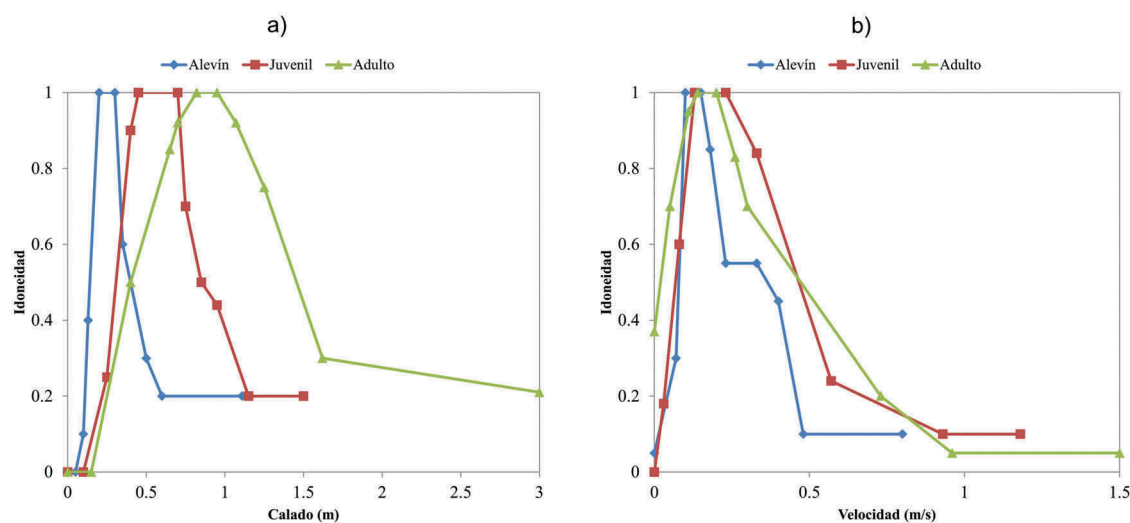


Figura 4. Curvas de idoneidad para el calado (a) y la velocidad (b) del *Salmo trutta* (estadios alevín, juvenil y adulto) según [34].

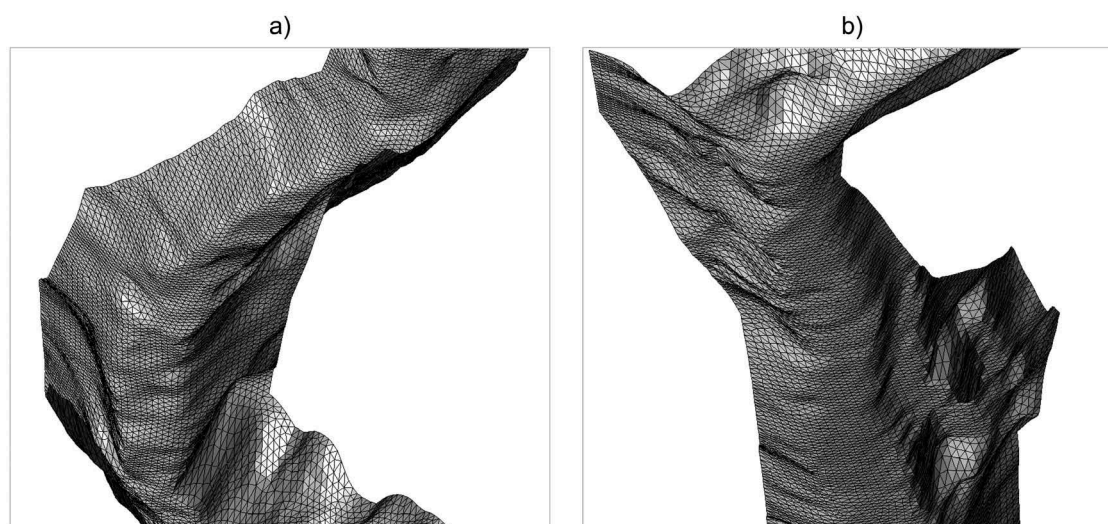


Figura 5. Representación de la malla de cálculo en el modelo numérico. Tramo inicial discontinuo con saltos y pozas (a) y tramo continuo (b), situado hacia final de la zona de estudio (CH Eume).

por la central por hallarse fuera de la zona de estudio. La rugosidad del lecho se fijó constante asumiendo los dos tercios finales como característicos del tramo de estudio (cauce bien definido), siendo de valor $0,04 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1/3}$ según Barnes [48]. Los obstáculos presentes, como grandes bolos, quedan bien definidos en la malla de cálculo como muestra la Figura 6.

Esquema numérico y tiempos de cálculo

Se realizó un único modelo y simulación gracias a la nueva herramienta de «Caudal escalonado», según un criterio de tolerancia del 3% (diferencia relativa entre el caudal de salida y el de entrada). El cálculo se ejecutó con un procesador para el tiempo necesario hasta simular todos los caudales, con una tolerancia seco-mojado de 0.01 m y un esquema numérico de primer orden [49].

Resultados

La integración del módulo de ecológico en Iber permitió visualizar los resultados de IHF en la misma ventana gráfica sin necesidad de tratamiento adicional o de exportación. La evaluación de los distintos escenarios en un mismo modelo (opción «Caudal escalonado») supuso una mejora en cuanto a tiempos globales (construcción y cálculo de un modelo). Así, el cálculo tuvo una duración de 48 min, mientras que cada caudal evaluado por separado, bajo las mismas condiciones, requirió entre 3 y 15 min cada uno (con un i7 a 3,5 GHz). Esta mejora, que redujo el tiempo de cálculo a la mitad, se atribuye a que el modelo inicia un nuevo escenario de caudal en la situación antecedente del caudal evaluado. Es decir, las condiciones hidráulicas de un caudal Q_i al final del cálculo son tomadas como condición inicial del caudal

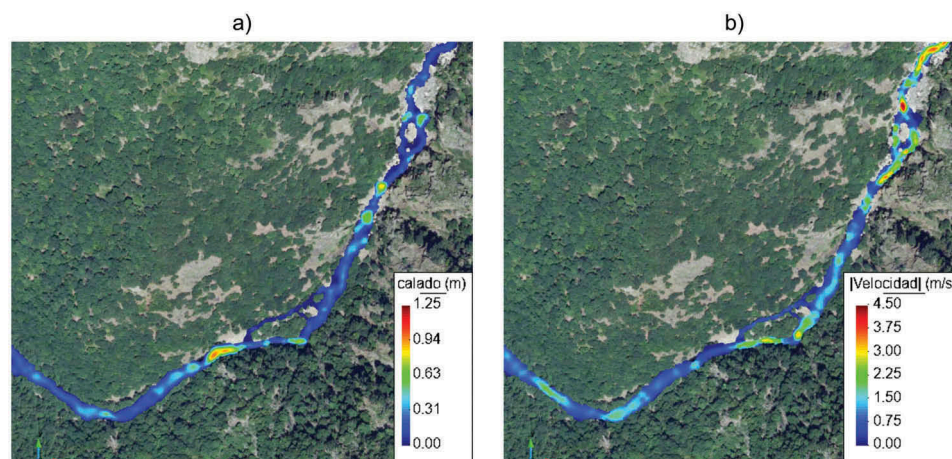


Figura 6. Mapas de calados (a) y de velocidades (b) para el caudal ecológico propuesto en el Plan Hidrológico - Anexo IV ($3,350 \text{ m}^3/\text{s}$) en el tramo central de la zona de estudio.

Q_{i+1} , siendo $Q_i < Q_{i+1}$. De esta manera, las condiciones finales de Q_i son más cercanas al régimen estacionario de Q_{i+1} , por lo que se requiere menor tiempo de cálculo.

Modelo hidrodinámico

El modelo fue capaz de representar adecuadamente la heterogeneidad hidráulica en todo el tramo de río estudiado. Como se observa en la Figura 6, los saltos y pozas se encuentran claramente definidos. Calados bajos y velocidades altas corresponden a saltos, en cambio calados altos y velocidades bajas corresponden a pozas.

Distribución espacial de la Idoneidad del Hábitat Físico (IHF)

El tramo de estudio presenta distribuciones de idoneidad del hábitat físico muy diferentes para cada estadio de desarrollo. En la Figura 7 se observa, a modo de ejemplo, de la distribución espacial de la IHF en dos tramos distintos. Por un lado, en las cercanías de la CH Eume donde el cauce es continuo (Figura 7 superior), para un caudal bajo ($0,149 \text{ m}^3/\text{s}$) la C_h se concentra en una pequeña zona justo aguas abajo del puente, mientras que la C_v es bastante alta en toda la zona. Esto provoca que la C_i se

concentre en la misma zona que la C_h . Del mismo modo, en el primer tercio, donde el cauce es discontinuo con la presencia de pozas y saltos (Figura 7 inferior), para un caudal moderado ($0,620 \text{ m}^3/\text{s}$) se observa un comportamiento muy similar.

En general, la IHF asociada a la velocidad es más alta que la del calado. Para los caudales evaluados se observa una tendencia clara hacia la obtención de valores de idoneidad reducidos en la mayor parte del tramo de estudio, siendo escasas las zonas donde la idoneidad (C_i) es óptima o cercana a ella.

Determinación del HPU

Los valores de HPU resultantes son reducidos para todos los caudales y estadios de desarrollo evaluados (Figura 8), quedando por debajo del 14% sobre el área total mojada. Las mejores condiciones de hábitat físico para los alevines se dan para caudales bajos ($< 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$), siendo el HPU máximo de 4416 m^2 para un caudal de $0,560 \text{ m}^3/\text{s}$ (12,78% del área mojada). Caudales medios (entre $0,5$ y $3 \text{ m}^3/\text{s}$) se muestran más adecuados para los juveniles (p. ej. para un caudal de $2,176 \text{ m}^3/\text{s}$ el juvenil se sitúa en el 8,8% mientras que el adulto en el 6,2%). Finalmente, para caudales elevados ($> 3 \text{ m}^3/\text{s}$) el HPU se reduce para todos

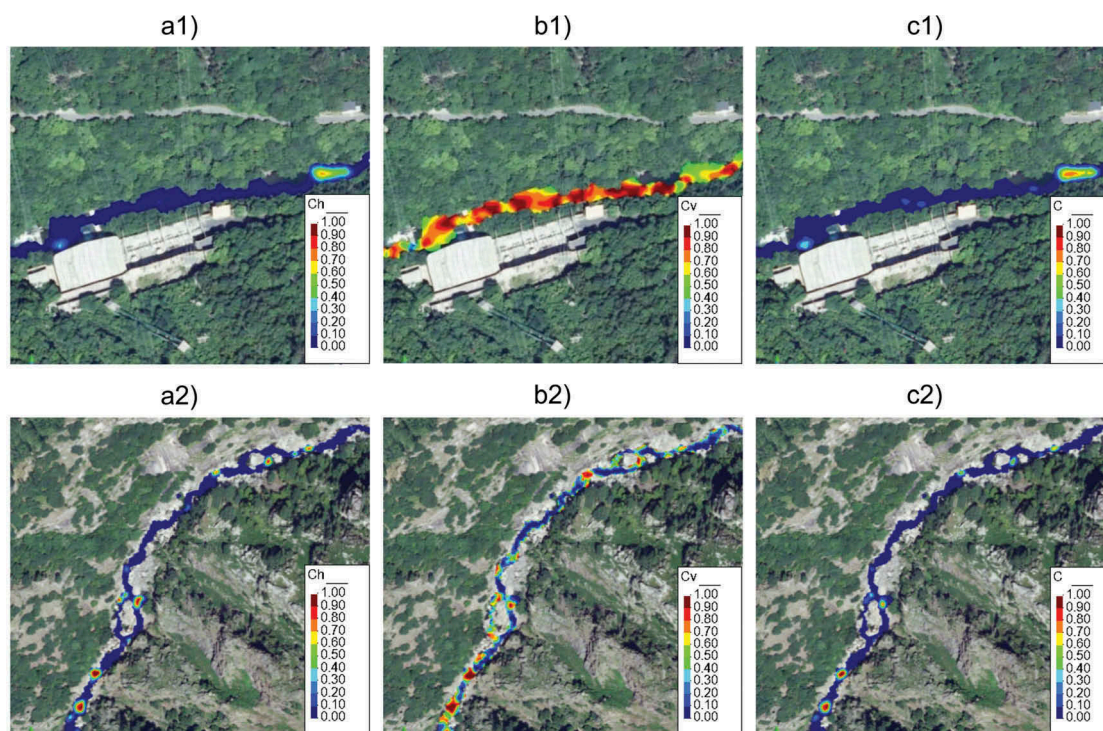


Figura 7. Ejemplos de mapas de idoneidad para el calado (a), la velocidad (b) y la combinación de ambos (c). En la parte superior (1) se muestran los resultados de idoneidad del estadio adulto para un caudal de $0,149 \text{ m}^3/\text{s}$ (cercanías de la CH Eume, tramo final del tramo). En la parte inferior (2) se muestran los resultados de idoneidad del estadio juvenil para un caudal de $0,620 \text{ m}^3/\text{s}$ (final del primer tercio del tramo, compuesto por un cauce discontinuo formado por saltos y pozas).

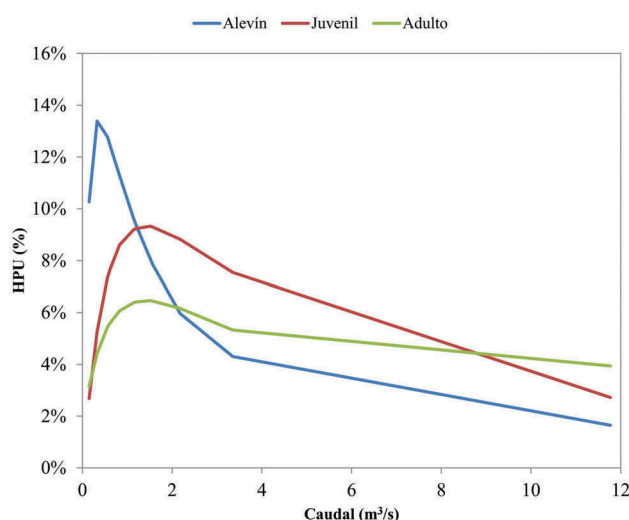


Figura 8. Curvas HPU-Q para el total del tramo de río estudiado y los tres estadios de desarrollo de la trucha común, donde se establecen los intervalos de caudal más adecuados para cada estadio, como aquellos que permiten un porcentaje más elevado de HPU en cada caso.

los estadios, indicando que el caudal para el cual se darían las condiciones idóneas para el mantenimiento del hábitat físico de la trucha oscilaría entre 0,5 y 2,2 m³/s.

Conclusiones

Se ha presentado el desarrollo de un nuevo modelo de hábitat en base al modelo bidimensional Iber, denominado IberHABITAT. Esta nueva herramienta permite caracterizar y evaluar la Idoneidad del Hábitat Físico (IHF), así como la distribución espacial de la disponibilidad y calidad del hábitat físico para distintos caudales de interés. A partir de estos resultados es posible cuantificar el Hábitat Potencial Útil (HPU) y su relación con el caudal circulante.

IberHABITAT se beneficia de las ventajas de los modelos hidráulicos bidimensionales en cuanto a las posibilidades de caracterización del flujo, en comparación con los modelos unidimensionales, así como de las ventajas de los esquemas numéricos basados en el método de los volúmenes finitos, en cuanto a robustez y versatilidad. Además, los modelos 2D permiten realizar un análisis a escala de meso-hábitat (tramos de río), que es una escala de trabajo más realista y adecuada para la valoración de la disponibilidad de hábitat físico de los peces. Asimismo, el desarrollo de herramientas *ad hoc* ha agilizado todo el proceso de construcción del modelo, cálculo y análisis de resultados. La opción «Caudal escalonado» permite evaluar, en un mismo modelo y una única simulación, distintos

caudales en régimen permanente. De este modo es posible obtener relaciones directas entre HPU y caudal, e incluso puede emplearse para el análisis escenarios de inundabilidad (p. ej. periodos de retorno).

La aplicación de este nuevo módulo en un tramo del río Eume permitió conocer la distribución espacial y temporal de la IHF de la trucha común (*Salmo trutta*). A pesar de la complejidad y heterogeneidad de las características hidrogeomorfológicas del tramo de río estudiado, el modelo fue capaz de obtener satisfactoriamente la distribución espacial de la IHF y el HPU. De los resultados presentados se desprende que, en el tramo estudiado, para la trucha común, el hábitat idóneo se concentra en puntos concretos y es altamente variable en función de los caudales y estadios de desarrollo. El HPU total para la trucha no supera en ninguno de los estadios y caudales evaluados el 14% del área total mojada, deduciéndose un posible intervalo de caudal óptimo entre 0,5 y 2,2 m³/s. Asimismo, se observa que, en cualquiera de los estadios de desarrollo del pez, el HPU no aumenta de forma continua con el caudal, sino que presenta un máximo para un caudal determinado y decrece para valores superiores del mismo.

Agradecimientos

Los trabajos expuestos han sido realizados con el apoyo de la Fundación Biodiversidad, del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, dentro del proyecto “Nuevas herramientas para la evaluación de la Idoneidad del Hábitat Físico y del Hábitat Potencial Útil para peces” (PRCV00561) en el marco de la Convocatoria de concesión de ayudas, en régimen de concurrencia competitiva, para la realización de actividades en el ámbito de la biodiversidad terrestre, biodiversidad marina y litoral 2017, y del proyecto “Propuesta de un régimen de caudal ecológico para el río Eume aguas abajo de la presa Eume (A Coruña)” realizado por el Institut Flumen y financiado por Endesa. De la misma forma, el trabajo se ha beneficiado de los avances metodológicos que se están obteniendo en el proyecto MorphPeak (CGL2016-78874-R), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y con fondos de la UE FEDER, así como del programa Serra Húnter para el contrato de profesor agregado Damià Vericat (Universidad de Lleida).

Información sobre los autores

Marcos Sanz-Ramos Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos e Ingeniero Técnico de Obras Públicas especializado en hidrología e hidráulica. Actualmente desarrolla su actividad profesional en el Institut Flumen (UPC-CIMNE) como investigador en el ámbito de la modelización hidráulica e hidrológica, siendo parte también del equipo de desarrollo del modelo Iber.

Ernest Bladé Castellet Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos y Director del Institut Flumen. Es profesor de la ETSECCPB (UPC) e investigador en el Instituto Flumen en los ámbitos de hidráulica, hidrología, dinámica fluvial, métodos numéricos e ingeniería de ríos.

Antoni Palau Ibars Dr. en Biología, profesor de la Universitat de Lleida e investigador en el Grupo de Dinámica Fluvial RIUS en los campos de limnología, física y química de ríos. Actualmente trabaja en la gestión medioambiental de embalses y ríos regulados.

Damià Vericat Querol Dr. en Geografía, profesor en la Universitat de Lleida e investigador en el Grupo de Dinámica Fluvial RIUS especializado en geomorfología fluvial. Actualmente la actividad investigadora se centra en el transporte de sedimentos en ríos, la morfología fluvial y la ecohidráulica.

Anaïs Ramos-Fuertes Licenciada en Ciencias Ambientales por la Universidad Autónoma de Madrid y doctora en el área de Ingeniería Civil por la Universidad Politècnica de Catalunya. Actualmente, investigadora postdoctoral en el Instituto Flumen UPC-CIMNE. Actividad investigadora centrada en la hidrometeorología y comportamiento térmico de masas de agua continentales, la modelización numérica aplicada a la hidrodinámica y calidad de aguas, y la incidencia del cambio climático en embalses.

Referencias

- [1] DOCE. Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. 2000:69.
- [2] Díez-Hernández JM, García-Rivera JA. Aplicación IFIM para el estudio de caudales ecológicos del embalse de Ruesga (Palencia), in: 6° Congr. For. Español; 2013. p. 1–13.
- [3] ACA. Validació biològica del règim de cabals de manteniment definits al Pla Sectorial de les CIC en 10 trams fluvials, Agència Catalana de l'Aigua, 2006.
- [4] Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG). Estudio del caudal ecológico por tramo de río, en ámbito CH Guadalquivir, 1998.
- [5] Parasiewicz P, Rubial JG, Sánchez MM, De Jalón Lastra DG. MesoHABSIM: Una herramienta eficaz para la gestión de ríos y cuencas fluviales. *Tecnol Del Agua*. 2009;29:20–26.
- [6] Díez-Hernández JM, Burbano L. Revisión de los modelos eco-hidráulicos uni-dimensionales (1D) y bi-dimensionales (2D) en corrientes fluviales. *Av En Recur Hidraul*. 2007;15:75–88.
- [7] Bovee KD. A guide to stream habitat analysis using the Instream Flow Incremental Methodology. *Instream Flow Information*, FWS/OBS–82/26. Fort Collins, CO. 1982;12:248.
- [8] Nestler JM, Stewardson MJ, Gilvear DJ, et al. Ecohydraulics exemplifies the emerging “paradigm of the interdisciplines”. *J Ecohydraulics*. 2016;1:5–15.
- [9] MMARM. ORDEN ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica. 2008:22966–22980.
- [10] de la Lanza Espino G, González Villela R, González Mora ID, et al. Caudal ecológico de ciertos ríos que descargan al Golfo de México y al Pacífico Mexicano. *Ribagua*. 2018;5:3–15.
- [11] Palau A, Alcázar J. The basic flow method for incorporating flow variability in environmental flows. *River Res Appl*. 2012;28:93–102.
- [12] Bladé E, Cea L, Corestein G, et al. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Rev Int Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ing*. 2014;30:1–10.
- [13] ASME. Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer ASME V & V 20-2009 Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer, ASME V&V 20-2009, The American Society of Mechanical Engineers. New York, 2009.
- [14] Jowett IG. RHYHABSIM river hydraulics and habitat simulation computer manual, National Institute of Water and Atmospheric Research report (unpublished). Hamilton, 1996.
- [15] Tonina D, Jorde K. Approaches for Ecohydraulic Non-Numerical Models. *Ecohydraulics An Integr Approach*. 2013:31–74.
- [16] Ghanem A, Steffler P, Hicks F, Katapodis C. Two-dimensional finite element modeling of flow in aquatic habitats. *Water Resour Eng*. 1995;95-S1
- [17] Ghanem A, Steffler P, Hicks F, Katapodis C. Two-dimensional hydraulic simulation of physical habitat conditions in flowing streams. *Regul Rivers Res Manag*. 1996;12:185–200.
- [18] Secretan Y, Leclerc M, Duchesne S, et al. Une méthodologie de modélisation numérique de terrain pour la simulation hydrodynamique 2D. *Rev Des Sci Eau*. 2001;14(2):187–212.
- [19] Steffler P, Blackburn J. Two-dimensional depth averaged model of river hydrodynamics and fish habitat. *User Manual River2D*, University of Alberta, Canada, 2002.
- [20] Hernández JMD, Neira NO. Evaluación ecohidráulica multidimensional del hábitat acuático en la conservación de hidrosistemas fluviales. *Ing y Univ*. 2008;12:301–323.
- [21] Ribó R, De Riera M, Escolano E. *GID Reference Manual*, Ed. CIMNE, Spain, 1999.
- [22] Cea L. An unstructured finite volume model for unsteady turbulent shallow water flow with wet-dry fronts: numerical solver and experimental validation, Universidad da Coruña, 2005. <http://hdl.handle.net/2183/805>.
- [23] Cea L, Bladé E. A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. *Water Resour Res*. 2015;51:5464–5486.
- [24] Bladé E. Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones, Universitat Politècnica de Catalunya, 2005. <http://tesi senred.net/handle/10803/6394> (accessed 29 May 2017).
- [25] López D, Díaz R, Rebollo JJ, et al. Aplicación del método SPH al estudio hidráulico de estructuras. Análisis hidrodinámico del aliviadero en pozo de la presa de Nagore (Navarra). *Ribagua*. 2016;3:1–7.

- [26] Sanz-Ramos M, Bladé E, Niñerola D, et al. Evaluación numérico-experimental del comportamiento histórico del coeficiente de rugosidad de los macrófitos. *Ing Del Agua*. 2018;22:109–124.
- [27] Bartholow JM. Modeling uncertainty: quicksand for water temperature modeling. In: *Conf. Hydrol. Extrem.*, American Institute of Hydrology; 2002 October 13–17;Portland, OR, 2002.
- [28] Bladé E, Cea L, Corestein G. Modelización numérica de inundaciones fluviales. *Ing Del Agua*. 2014;18:68.
- [29] Knight DW. River hydraulics - a view from midstream. *J Hydraul Res*. 2013;51:2–18.
- [30] Bermúdez M, Cea L, Puertas J, et al. Numerical modeling of the impact of a pumped-storage hydroelectric power plant on the reservoirs' thermal stratification structure: a case study in NW Spain. *Environ Model Assess*. 2018;23:71–85.
- [31] Bermúdez M, Cea L, Puertas J, et al. Hydraulic model study of the intake-outlet of a pumped-storage hydro-power plant. *Eng Appl Comput Fluid Mech*. 2017;11:483–495.
- [32] Meselhe EA, Georgiou I, Allison MA, et al. Numerical modeling of hydrodynamics and sediment transport in lower Mississippi at a proposed delta building diversion. *J Hydrol*. 2012;472–473:340–354.
- [33] Pisaturo GR, Righetti M, Dumbser M, et al. The role of 3D-hydraulics in habitat modelling of hydropeaking events. *Sci Total Environ*. 2017;575:219–230.
- [34] CHE, ACA. Cálculo de caudales ambientales y validación biológica en tramos significativos de la red fluvial de Cataluña, 2008.
- [35] Mayo M, Gallego B, García de Jalón D, et al. Preferencias de hábitat de la trucha común en la época de freza. *Río Dulce, Guadalajara. Limnética*. 1995;11:49–54.
- [36] Martínez-Capel F, García de Jalón D. Desarrollo de curvas de preferencia de microhábitat para *Leuciscus pyrenaicus* y *Barbus bocagei* por buceo en el río Jarama (Cuenca del Tajo). *Barcelona, Spain: Limnética*. 1999;17:71–84.
- [37] Booker DJ. Generalized models of riverine fish hydraulic habitat. *J Ecohydraulics*. 2016;1:1–19.
- [38] Palau A, Alcázar J, Rocaspana R, et al. Misusing physical habitat assessment techniques for environmental flows calculations. In: *Proc. 11th Int. Symp. Ecohydraulics*; Melbourne, 2016.
- [39] Cea L, Vázquez-Cendón ME. Unstructured finite volume discretization of two-dimensional depth-averaged shallow water equations with porosity. *Int J Numer Methods Fluids*. 2009;63:903–930.
- [40] Cea L, Vázquez-Cendón ME, Puertas J. El método de volúmenes finitos aplicado a problemas de ingeniería fluvial y costera. *Gac La RSME*. 2009;12:71–93.
- [41] LeVeque RL. Finite volume methods for hyperbolic problems. *Cambridge Texts Appl Math*. 2001;31.
- [42] Toro EF. Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics. *Berlin: Springer*; 2009.
- [43] Vázquez-Cendón ME. Improved treatment of source terms in upwind schemes for the shallow water equations in channels with irregular geometry. *J Comput Phys*. 1999;148:497–526.
- [44] Cea L, Bermudez M, Puertas J, et al. IberWQ: new simulation tool for 2D water quality modelling in rivers and shallow estuaries. *J Hydroinformatics*. 2016;18:816–830.
- [45] Corestein G, Bladé E. Validación del módulo de transporte de sedimentos de fondo - Modelo Iber. In: *III Jornadas Ing. Del Agua La Protección Contra Los Riesgos Hídricos, JIA 2013, Valencia, Spain, 2013*. p. 27–34.
- [46] Alba-Tercedor J, Jáimez-Cuéllar P, Álvarez M, et al. Caracterización del estado ecológico de ríos mediterráneos ibéricos mediante el índice IBMWP (antes BMWP). *Barcelona, Spain: Limnética*. 21;2002:175–185.
- [47] Shannon CE, Weaver W. The mathematical theory of communication. *Combined Academic Publ.* (1 de diciembre de 1949). *University of Illinois Press. Urbana, IL, EEUU*, 1949.
- [48] Barnes HH. Roughness characteristics of natural channels. *Tech. Report, Geol. Surv. Water-Supply, United States Gov. Print. Off. Washington*. 1987:219. doi:10.1016/0022-1694(69)90113-9.
- [49] Roe PL. A basis for the upwind differencing of the two-dimensional unsteady Euler equations. In: *Morton KW, Baines MJ, editors. Numerical methods for fluid dynamics II*. *Oxford: Oxford University Press*; 1986. p. 59–80.