

Aplicación web para la evaluación de diseños de escalas de peces de hendidura vertical

M. Bermúdez, A. Rico, A. Rodríguez, L. Pena, J. R. Rabuñal, J. Puertas
E.T.S. Ingenieros de Caminos y Facultad de Informática de la Universidad de A Coruña

L. Balairón, A. Lara, E. Aramburu
Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX

F. Morcillo
Personal contratado I+D+i CEDEX (marzo 2007 – febrero 2015)

M. Castillo
Becaria de Formación de Personal Investigador CEDEX (noviembre 2010 – noviembre 2014)

1. Introducción

Los ríos y cursos fluviales son el hábitat de un amplio número de especies animales, muchas de las cuales realizan grandes desplazamientos a lo largo del ecosistema para completar sus ciclos vitales. Las obras hidráulicas transversales como presas, diques, azudes y otros obstáculos constituyen una barrera física para estos movimientos naturales de los peces, provocando lo que se conoce como efecto barrera.

Entre las soluciones para restaurar la conectividad longitudinal de los cursos fluviales se encuentra la construcción de escalas de peces, siendo las de hendidura vertical una tipología que presenta ciertas ventajas. A grandes rasgos, se trata de canales en pendiente divididos en una serie de depósitos sucesivos por tabiques transversales que poseen una hendidura vertical a lo largo de toda su altura. Sus características hidráulicas varían de acuerdo con la pendiente, el caudal y la configuración y dimensiones de las piscinas, la hendidura y los tabiques. Entre sus características ventajosas destacan su adaptabilidad a las variaciones de nivel (su funcionamiento hidráulico permanece estable), el camino de ascenso no tortuoso y las zonas de descanso que proporcionan a los peces en su remonte, así como la posibilidad de que elijan la profundidad de natación.

Un diseño adecuado de escala de peces de hendidura vertical debe permitir a las poblaciones objetivo franquear el obstáculo sin retraso, estrés o daños perjudiciales en su desplazamiento río arriba. El funcionamiento hidráulico de la escala debe adaptarse por tanto a las capacidades y necesidades de las especies objetivo. Uno de los principales factores biológicos a tener en cuenta es la capacidad de natación de los peces migratorios.

Las velocidades de natación de los peces varían ampliamente, en relación con factores biológicos como la longitud corporal y con factores físicos como la temperatura del agua (Hammer, 1995; Tudorache et al., 2008; Myrick y Cech, 2000). Además, son necesarios unos calados mínimos para que los peces alcancen su potencial de natación (Dane, 1978). Igualmente, altos niveles de turbulencia y aireación pueden aumentar el coste de natación y provocar pérdidas de equilibrio y desorientación del pez (Enders et al., 2003; Odeh et al. 2002). En general, las condiciones hidráulicas en la escala deben ser tales que los nadadores más débiles sean capaces de atravesarlas, y existe un cierto consenso sobre la influencia de las variables señaladas anteriormente en la eficiencia de un diseño (Katopodis, 2005; Hotchkiss, 2002; Odeh et al., 2002).

Para facilitar el acceso a este conocimiento multidisciplinar, es posible desarrollar herramientas computacionales que incorporen los resultados de los principales estudios hidráulicos y biológicos en este campo. En este trabajo se presenta una herramienta de este tipo que permite evaluar la bondad de un diseño de escala de peces de hendidura vertical desde un punto de vista biológico. Se trata de una aplicación informática en web que analiza si las propiedades hidrodinámicas de un diseño de escala se ajustan a los requisitos de las especies objetivo. Teniendo en cuenta la complejidad de los fenómenos hidráulicos y biológicos involucrados en el remonte de una escala de peces, esta herramienta no pretende determinar un diseño óptimo, sino establecer una forma objetiva para comparar distintos diseños y determinar, dada una serie de diseños, cual será previsiblemente más eficiente.

La aplicación es el resultado de varios estudios llevados a cabo en el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (CEH-CEDEX) y en la Universidad de A Coruña, que se resumen a continuación, así como de una profunda revisión del estado del arte. Se busca con ella facilitar a los técnicos involucrados en el diseño de escalas de peces de hendidura vertical la aplicación sistemática de criterios hidrobiológicos, que incorporen además los resultados de las investigaciones más recientes en este ámbito.

2. Antecedentes

2.1 Estudio hidrodinámico

En esta sección se expone la base teórica de los criterios de diseño que incorpora la aplicación informática. La caracterización hidráulica de los diseños de escala de la aplicación está basada en los trabajos llevados a cabo por Bermúdez (2013), Bermúdez et al. (2010) y Puertas et al. (2004, 2012). En estos estudios se analiza mediante modelización física y numérica el campo de flujo en 4 diseños genéricos de piscina (Figura 1) y, para cada uno de ellos, se prueban distintas dimensiones geométricas de piscina. El rango de dimensiones estudiado es $5 < L/b < 15$, $2 < B/b < 8$, siendo L la longitud de piscina, B la anchura de piscina y b la anchura de hendidura. Este rango cubre ampliamente los diseños más comunes y recomendados en la literatura (Rajaratnam et al., 1992).

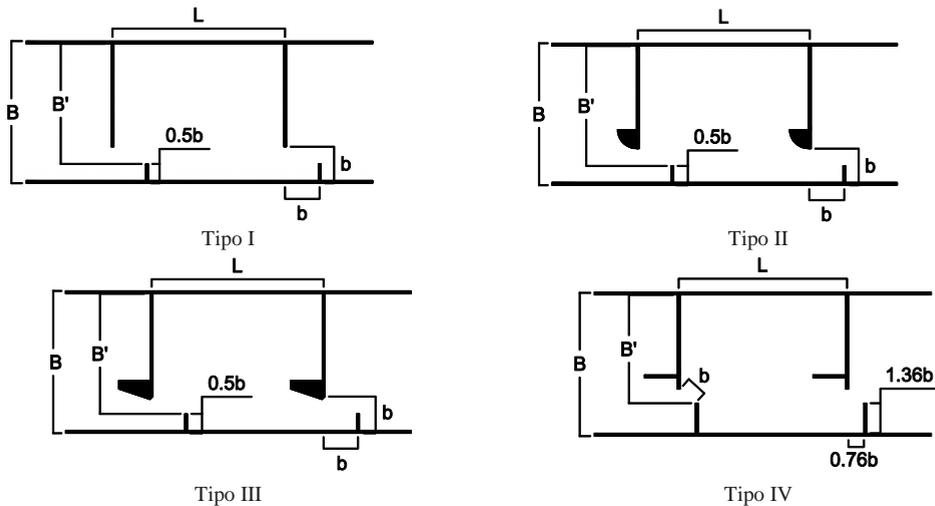


Figura 1. Configuración geométrica de los diseños tipo incluidos en la aplicación.

Los resultados de estos trabajos comprenden la definición del campo de velocidades, las relaciones caudal-calado (también denominadas curvas de descarga) y la potencia disipada por unidad de volumen. La velocidad media en estas estructuras es prácticamente bidimensional, siendo la velocidad vertical mucho menor que la horizontal, e independiente del caudal. Los campos de velocidades muestran en todos los diseños una región de flujo principal definida por un chorro de gran velocidad y dos zonas de recirculación con velocidades bajas a ambos lados del mismo. Por su parte, las curvas de descarga permiten una estimación, para cada diseño de piscina y anchura de hendidura, de los caudales necesarios para mantener un determinado calado en la escala. Se definen de acuerdo con:

$$Q = C_q \cdot \sqrt{g \cdot S \cdot L} \cdot b \cdot h_c \quad [1]$$

donde C_q es un coeficiente que depende de la geometría de la piscina, h_c es el calado en el centro de piscina, g es la aceleración de la gravedad, S es la pendiente de la escala, L es la longitud de piscina y b es la anchura de hendidura. El coeficiente C_q se sitúa entre 0.73 y 1.09 en los diseños estudiados, y su valor para cada diseño concreto puede ser consultado en Puertas et al. (2012).

Por último, para evaluar los niveles de aireación y turbulencia en las escalas se utiliza como indicador la potencia disipada por unidad de volumen E , definida de la siguiente forma:

$$E = C_q \cdot \rho \cdot \sqrt{g^3 \cdot S^3 \cdot L} \cdot b / B \quad [2]$$

donde ρ es la densidad del agua y B la anchura de piscina. Esta expresión permite estimar el valor de potencia disipada por unidad de volumen dado un diseño, ya que es independiente del caudal circulante.

2.2 Estudio biológico

El estudio biológico clave en el desarrollo de esta herramienta informática ha sido llevado a cabo en la escala de peces del Laboratorio de Hidráulica del CEH-CEDEX. Este estudio comprende la ejecución de tres campañas de ensayos con cuatro especies autóctonas (la trucha común, el barbo común, el barbo del Mediterráneo y la boga del Tajo) en un modelo físico de una escala de peces a tamaño real. El diseño de escala es de tipo IV, con $B=1.5$ m y $L=1.85$ m, siguiendo la nomenclatura de la Figura 1. El protocolo de ensayos y la metodología experimental, que utiliza técnicas de visión e inteligencia artificial para analizar el comportamiento de los peces, se describe en detalle en Aramburu et al., 2014 y Rodríguez et al., 2011.

En estos ensayos ha sido posible reconstruir las trayectorias e identificar las zonas realmente empleadas por los peces en su ascenso. Por una parte, se ha comprobado que los peces de todas las especies ensayadas no remontan la escala de forma continua, sino que van ascendiendo de un estanque al siguiente realizando descansos de duración variable en las zonas de recirculación existentes a cada lado del flujo principal. Además, minimizan en la medida de lo posible sus desplazamientos por la zona de flujo principal, que solo atraviesan para intentar remontar o para moverse de una zona de recirculación a otra. Entre las variables que afectan a la eficiencia de la escala se encuentra también el caudal, habiéndose observado mayores porcentajes de ascenso con el caudal más bajo ensayado (100 l/s, que proporciona calados de aproximadamente 0.30 m) que con el caudal mayor (250 l/s, con calados del orden de 0.75 m). Los porcentajes de eficiencia observados en cada uno de los ensayos realizados están recogidos en Aramburu et al. (2014).

Las velocidades de natación de los peces derivadas de los ensayos son coherentes con las observaciones realizadas por otros autores en relación con las velocidades punta de salmónidos y ciprínidos. En este trabajo se considera por una parte la velocidad máxima de $10LC/s$, siendo LC la longitud corporal del pez, como simple aproximación e independientemente de la especie (Hammer, 1995; Videler, 1993). Por otra parte, para la caracterización de las velocidades punta y sostenidas, se utilizan en este trabajo las curvas “velocidad del agua-autonomía del pez” desarrolladas por Elvira et al. (2008), basadas en la revisión de estudios experimentales de otros autores. Estas curvas relacionan la velocidad de natación y la resistencia de distintas especies, agrupadas en familias de salmónidos y ciprínidos, y para temperaturas del agua templadas (se prescinde del efecto de la temperatura). Permiten calcular así la distancia máxima D_{\max} (cm) que el pez puede recorrer frente a la velocidad del agua U (cm/s), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$D_{\max} = -c \cdot \exp\left(\frac{u}{c} - \frac{a}{c}(LC)^b - 1\right) \quad [3]$$

donde LC es la longitud corporal del pez (mm) y a , b y c son coeficientes para los que los autores sugieren los siguientes valores: $a=17.31$, $b=0.47$ y $c=-16.02$ para salmónidos y $a=30.34$, $b=0.34$ y $c=-14.29$ para ciprínidos.

Además del campo de velocidades, otro de los factores que parece tener gran influencia en el comportamiento de los peces es el nivel de turbulencia desarrollado en las piscinas. En este trabajo, se adopta un valor máximo de 200 W/m^3 para pasos cuya especie objetivo sean salmónidos y 150 W/m^3 para no salmónidos. Estos valores se aceptan como un criterio general, sin base conceptual sólida y sin validación en los ensayos biológicos realizados en el CEDEX, pero cuyo uso está muy extendido (Larinier et al., 2002).

Otro de los factores a evaluar es el calado desarrollado en la escala, ya que los peces necesitan un calado mínimo para poder desarrollar su potencial de natación (Dane, 1978). En dispositivos como los caños de drenaje se recomiendan calados mínimos del orden de 2.5 veces la altura de la aleta caudal (aleta de la cola), siendo ésta del orden del 32% de la longitud de horquilla para juveniles de salmón (ADF&G y ADOT&PF, 2001). Como parte de este trabajo, se ha realizado un análisis morfológico de las cuatro especies ensayadas en el CEH-CEDEX y se han estudiado las relaciones entre la longitud de la aleta caudal extendida y la longitud furcal del pez. En base a los resultados obtenidos y teniendo en cuenta las recomendaciones anteriores, se establece en la aplicación un calado mínimo de 25 cm, independientemente de la especie y talla.

3. Análisis de la aplicación web

3.1 Restricciones de velocidad

Para evaluar si el pez puede remontar la escala, su capacidad de natación debe ser comparada con el campo de velocidades. Dada una trayectoria de ascenso del pez, la velocidad de la corriente en cada punto puede obtenerse a partir del campo de velocidades. Una de las trayectorias más restrictivas que el pez puede seguir durante el remonte se corresponde con la línea de corriente que atraviesa las hendiduras verticales (Figura 2). Dicha trayectoria se considera del lado de la seguridad en vista de lo observado en el estudio biológico llevado a cabo en el CEH-CEDEX. A partir de esta trayectoria teórica se definen las restricciones de velocidad.

La primera restricción analiza el esfuerzo que el pez debe hacer para atravesar la hendidura vertical. Esta restricción se evalúa comparando la velocidad máxima del agua en toda la trayectoria (U_{\max}) con la velocidad punta del pez objetivo. De esta forma, se limita el valor de $S \times L$ (pendiente \times longitud de piscina) para cada diseño de forma que se verifique que $U_{\max} < 10LC/s$, siendo LC la longitud corporal del pez.

Alternativamente, es posible utilizar las curvas “velocidad del agua-autonomía del pez” para analizar el paso por la hendidura. Como ya se ha señalado anteriormente, en ausencia de curvas específicas para especies ibéricas se consideran en este trabajo las curvas definidas por Elvira et al. (2008), genéricas para salmónidos y ciprínidos y temperatura media del agua. En este caso, se propone considerar una distancia recorrida de 4 veces la anchura de hendidura (4b) y comparar la velocidad máxima que proporcionan dichas curvas con la velocidad máxima del agua U_{\max} .

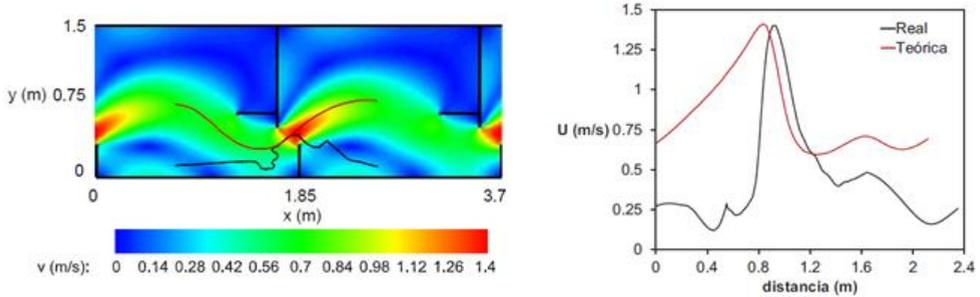


Figura 2. Campo de velocidades (izquierda) y perfil de velocidades (derecha) a lo largo de una de las trayectorias más restrictivas y de una trayectoria real seguida por un ejemplar de trucha común en la escala de peces del CEH-CEDEX.

Aun cuando las velocidades del flujo se sitúen por debajo de su rango de velocidad punta, el esfuerzo necesario para atravesar la escala puede fatigar al pez hasta el punto de no poder continuar su avance y provocar su descenso. Por tanto, dos restricciones adicionales relacionan el campo de velocidades en las piscinas con las curvas “velocidad del agua-autonomía del pez”. Por una parte, se impone que el pez tiene que ser capaz de remontar una piscina completa sin descanso. Por otra parte, no es razonable pensar que el pez pueda remontar un número indefinido de estanques en la escala puesto que, aunque descansa, realiza un esfuerzo progresivo y va fatigándose. Por tanto, un criterio más completo contempla también la longitud total recorrida por el pez en la escala.

Para poder emplear las curvas “velocidad del agua-autonomía del pez”, se considera de nuevo la trayectoria cuya longitud (L_{t2}) es igual a la longitud de la línea de corriente que atraviesa la hendidura vertical en una piscina y se calcula una velocidad de la corriente equivalente constante a partir del perfil de velocidades de dicha trayectoria (U_{eq}). Los valores de velocidad máxima (U_{max}), velocidad equivalente (U_{eq}) y longitud de la trayectoria en una piscina (L_{t2}) en cada uno de los diseños considerados en la aplicación pueden consultarse en Puertas et al. (2012).

En el caso particular del diseño ensayado en el CEH-CEDEX (diseño tipo IV con $B=5.55b$ y $L=6.85b$), la velocidad equivalente U_{eq} se pondera con un factor corrector C . Este coeficiente refleja que el desplazamiento a lo largo de la longitud total de la escala no se efectúa de forma estrictamente continuada, así como la influencia del caudal circulante en la eficiencia de paso, según lo observado en los ensayos (Aramburu et al., 2014).

3.2 Restricciones de turbulencia

Además del campo de velocidades, otro de los factores que parece tener gran influencia en el comportamiento de los peces es el nivel de turbulencia desarrollado en las piscinas. Para cuantificar los niveles de turbulencia que se producen en los distintos diseños se utiliza la potencia disipada por unidad de volumen, definida en la Ecuación 2. Se limitan los niveles de turbulencia y aireación en las piscinas estableciendo valores máximos dicha potencia

disipada por unidad de volumen en función de las especies objetivo. En este caso, debe ser inferior a 200 W/m^3 para pasos cuya especie objetivo sean salmónidos y a 150 W/m^3 en el caso de no salmónidos

3.3 Restricciones de calado

Por último, esta restricción busca identificar los caudales que proporcionan calados aceptables para los peces. Para ello se utilizan directamente las curvas de descarga (Ecuación 1) que relacionan caudales y calados. La aplicación impone un calado mínimo de 25 cm, independientemente de la especie y talla, y permite definir un calado máximo en base a criterios constructivos. Esto permite una estimación, para cada diseño y anchura de hendidura, del caudal mínimo para garantizar un calado aceptable para los peces y del caudal máximo.

3.4 Interfaz

Para facilitar la aplicación de estos criterios se ha desarrollado una aplicación informática en web, cuya interfaz se describe a continuación. Dispone de dos pestañas diferenciadas, denominadas resultados validados en el CEDEX y resultados investigación (Figura 3). Se puede acceder a la misma desde: <http://www.citeec.udc.es/peces/Pages/default.aspx>, con el usuario: ingenieria_agua y la contraseña: iwa2015.

La primera pestaña permite trabajar sobre el diseño concreto en el que se han desarrollado los ensayos en el CEH-CEDEX. Se trata por tanto de un diseño tipo IV con $B=5.55b$ y $L=6.85b$. El usuario debe introducir los siguientes datos iniciales: altura del obstáculo, anchura de hendidura, pendiente de la escala y caudal. En relación con la especie objetivo, debe indicar la familia (salmónidos o ciprínidos), la talla y el coeficiente corrector C (opcionalmente). La aplicación evalúa el cumplimiento de las restricciones de velocidad y de calado, que se representan también de forma gráfica.

La segunda pestaña permite evaluar cualquier diseño dentro de los cuatro tipos genéricos mostrados en la Figura 1, para los rangos de dimensiones geométricas habituales. El usuario debe introducir todas las dimensiones geométricas: altura del obstáculo, pendiente de la escala, tipo de diseño, longitud de piscina, anchura de hendidura y anchura de piscina. En primer lugar, el programa comprueba que el diseño se encuentra efectivamente dentro de los rangos de dimensiones geométricas estudiadas y, en su caso, aproxima el valor de U_{max} , U_{eq} , L_{t2} y C_q a partir de los datos disponibles en diseños similares.

Una vez introducidas las especies objetivo y su talla, se comprueban las restricciones de velocidad y de turbulencia. Los requisitos de calado se analizan de igual forma que en la pestaña anterior, tras fijar el usuario un caudal circulante y un calado mínimo y máximo. Todas las restricciones se representan gráficamente y se muestra un vídeo de un diseño similar en funcionamiento.

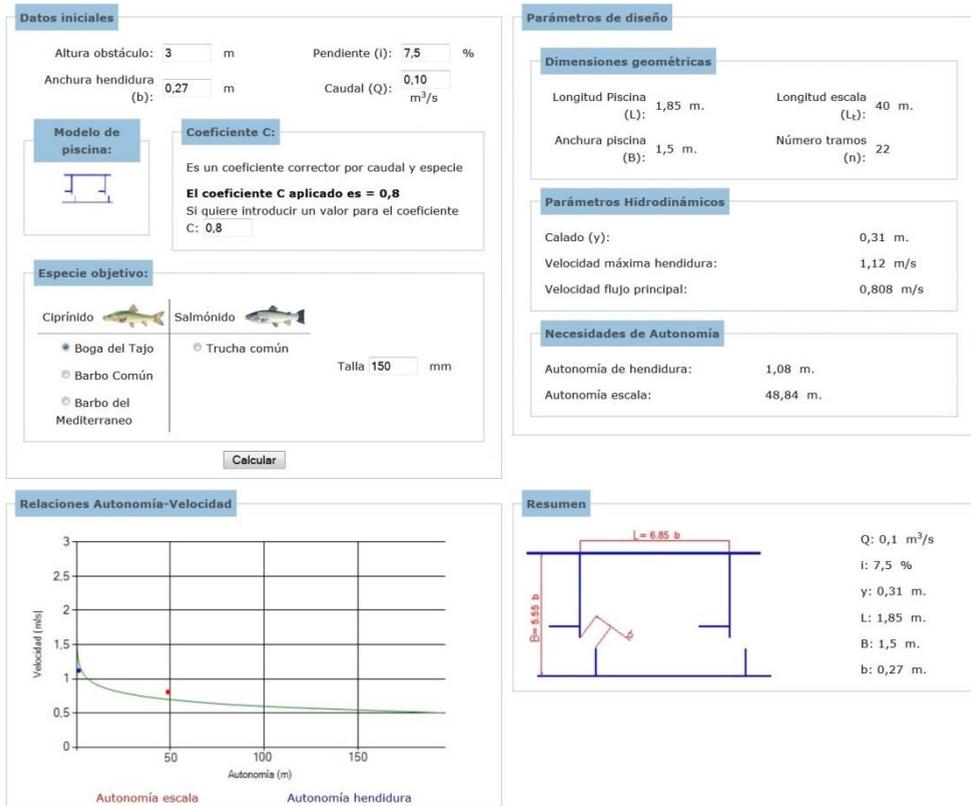


Figura 3. Ejemplo de salida de la aplicación en la primera pestaña. En este caso el diseño no es adecuado para la especie y talla objetivo, se incumple una de las restricciones de velocidad.

4. Conclusiones

En este artículo se presenta una aplicación informática en web para analizar la eficiencia biológica de diferentes diseños de escalas de hendidura vertical.

En primer lugar, el modelo impone criterios de velocidad para verificar que la velocidad del flujo es lo suficientemente baja como para que los peces puedan remontar. Por una parte, se comparan las máximas velocidades del flujo con las velocidades punta de los peces. Por otra parte, el campo de velocidades en las piscinas se relaciona con las curvas “velocidad del agua-autonomía del pez” de los peces a partir de una velocidad equivalente a lo largo de la trayectoria del pez, y considerando la distancia recorrida por el mismo. Asimismo, la metodología limita la potencia disipada por unidad de volumen teniendo en cuenta los valores recomendados en la literatura para las distintas especies.

Siguiendo este procedimiento, se obtienen unas dimensiones de piscina que aseguran que

las velocidades del flujo y los niveles de turbulencia y aireación sean admisibles para los peces. Una vez fijadas las características geométricas, se evalúan las curvas de descarga para cada diseño y se determina el rango de caudales que proporciona calados aceptables para el pez.

Teniendo en cuenta la complejidad de los fenómenos hidráulicos y biológicos implicados en el proceso de remonte de una escala de peces, resulta obvio que la metodología propuesta no trata de establecer de forma exacta la menor talla de una especie concreta que es capaz de remontar una escala. No obstante, constituye una forma objetiva de comparar diferentes diseños y de determinar, dada una serie de diseños, cuál de ellos es el más eficiente. La presente aplicación se enmarca en el contexto facilitar a los técnicos involucrados en el diseño de escalas de peces la aplicación de criterios hidrobiológicos y metodologías sistemáticas para evaluar su funcionamiento.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por fondos FEDER y el Ministerio de Economía y Competitividad (Ref. CGL2012-34688 y PCT-380000-2007-3). María Bermúdez expresa su agradecimiento al programa postdoctoral del Plan I2C de la Xunta de Galicia (Ref. ED481B 2014/156-0).

Referencias

ADF&G, Alaska Department of Fish and Game, and ADOT&PF, Alaska Department of Transportation and Public Facilities, 2001. Memorandum of Agreement between Alaska Department of Fish and Game and Alaska Department of Transportation and Public Facilities for the Design, Permitting, and Construction of Culverts for Fish Passage. Juneau.

Aramburu, E., Morcillo, F., Castillo, M., Lara, A, 2014. Investigación sobre el comportamiento de los peces en una escala existente en el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. Conclusiones de las campañas de ensayos 2009-2012. Ing. Civil 173.

Bermúdez, M. 2013. Evaluación hidráulica y biológica de diseños de escalas de peces de hendidura vertical para especies de baja capacidad natatoria. Tesis doctoral, Departamento de Métodos Matemáticos y de Representación, Universidad de A Coruña.

Bermúdez, M., Puertas, J., Cea, L., Pena, L., Balairón, L., 2010. Influence of pool geometry on the biological efficiency of vertical slot fishways. *Ecological Engineering* 36 (10), 1355–1364.

Dane, B. G., 1978. A Review and Resolution of Fish Passage Problems at Culvert Sites in British Columbia. Fisheries and Marine Service Technical Report Nº 810, Dept. of Fisheries and Environment, Vancouver. 126 p.

Elvira, B., Almodóvar, A., Nicola, G.G., Ayllón, D., Parra, I., Almeida, D., 2008. Modelos de velocidades de natación crítica y curvas de velocidad-autonomía en salmónidos. Convenio de

colaboración entre el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas y la Universidad Complutense de Madrid: Investigación experimental sobre diseño hidráulico de pasos para peces. Informe interno.

Enders, E.C., Boisclair, D., and Roy, A.G., 2003. The effect of turbulence on the cost of swimming for juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian J. Fish. Aqu. Sci.* 60, 1149-1160.

Hammer, C., 1995. Fatigue and exercise tests with fish. *Comp. Biochem. Physiol., A* 112, 1–20.

Hotchkiss, R., 2002. Turbulence Investigation and Reproduction for Assisting Downstream Migrating Juvenile Salmonids, Part I of II. Report to Bonneville Power Administration (BPA Report DOE/BP-00004633-I), Portland, OR, 138 p.

Katopodis, C., 2005. Developing a toolkit for fish passage, ecological flow management and fish habitat works. *Journal of Hydraulic Research* 43(5), 451-467.

Larinier, M., Travade, F., Porcher, J.P., 2002. Fishways: biological basis, design criteria and monitoring. *Bulletin Français Pêche et Pisciculture* 364 (Suppl.), 208.

Myrick, C.A., Cech, J.J., 2000. Swimming performances of four California stream fishes: temperature effects. *Environmental Biology of Fishes* 58, 289–295.

Odeh, M., Noreika, J. F., Haro, A., Maynard, A., Castro-Santos, T., Cada, G. F., 2002. Evaluation of the Effects of Turbulence on the Behavior of Migratory Fish. U.S. Geological Survey, Glenn F. Report to Bonneville Power Administration (BPA Report DOE/BP-00000022-1), Portland, OR, 55 p.

Puertas, J., Pena, L., and Teijeiro, T., 2004. Experimental approach to the hydraulics of vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering* 130(1), 10-23.

Puertas, J., Cea, L., Bermúdez, M., Pena, L., Rodríguez, A., Rabuñal, J.R., Balairón, L., Lara, A., Aramburu, E. 2012. Computer application for the analysis and design of vertical slot fishways in accordance with the requirements of the target species. *Ecological Engineering* 48, 51-60.

Rajaratnam, N., Katopodis, C., Solanki, S., 1992. New designs for vertical slot fishways. *Canadian Journal of Civil Engineering* 19 (3), 402–414

Rodríguez, A., Bermúdez, M., Rabuñal, J.R., Puertas, J., Dorado, J., Pena, L., Balairón, L., 2011. Optical fish trajectory measurement in fishways through computer vision and artificial neural networks. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 25(4), 291-301.

Tudorache, C., Viaene, P., Blust, R., Vereecken, H., de Boeck, G., 2008. A comparison of swimming capacity and energy use in seven European freshwater fish species. *Ecology of Freshwater Fishes* 17(2), 284–291.

Videler, J.J., 1993. *Fish Swimming*. Fish & Fisheries Series 10, Chapman & Hall, London, 260 p