

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

Research on fish behaviour in a fishway in the Hydraulic Laboratory of the Centre for Hydrographic Studies (CEDEX). Conclusions of the experiment period from 2009 to 2012.

Enrique Aramburu Godínez^{1*}, Felipe Morcillo Alonso¹, Miriam Castillo Blanco¹ y Ángel Lara Domínguez¹

Palabras clave

pasos para peces;
escalas de peces;
escalas de hendidura vertical;
salmónidos;
ciprínidos;
migración de peces;

Sumario

El Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX) ha llevado a cabo en los últimos años un estudio sobre el comportamiento de algunas especies de salmónidos y ciprínidos en una escala de hendidura vertical construida a tal efecto en dicho Laboratorio. El objeto que persigue la investigación es poder dar unos criterios de diseño para esta tipología de escalas que tengan en cuenta las capacidades nataatorias de los peces. Para ello se ha analizado en la escala el comportamiento de cuatro especies autóctonas: la trucha común (*Salmo trutta*), la boga del Tajo (*Pseudochondrostoma polylepis*), el barbo común (*Luciobarbus bocagei*) y el barbo del Mediterráneo (*Luciobarbus guiraonis*).

Keywords

fish passes;
fishways;
vertical slot fishway;
salmonids;
cyprinids;
fish migration;

Abstract

*In recent years, the Hydraulics Laboratory of the Centre for Hydrographic Studies (CEDEX) has carried out a study about fish passage behaviour in a vertical slot fishway built for that purpose in this Laboratory. The objective pursued by this research is to provide design criteria for this type of fishways that consider the fish swimming abilities. To that end, the behaviour of four native species has been analysed: brown trout (*Salmo trutta*), Iberian nase (*Pseudochondrostoma polylepis*), common barbel (*Luciobarbus bocagei*) and Mediterranean barbel (*Luciobarbus guiraonis*).*

1. INTRODUCCIÓN

Desde el año 2003 en el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX se vienen realizando diversos trabajos para la Dirección General del Agua del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente en el ámbito de la Hidráulica Ambiental. Dentro de este marco se han llevado a cabo varios trabajos referentes a escalas de peces en presas y azudes. Una de las principales actuaciones de dichos trabajos ha consistido en la construcción de una escala para peces en la nave del Laboratorio de Hidráulica para la experimentación con diversas especies.

La conservación de la biodiversidad de la ictiofauna dulceacuícola es uno de los principales retos de la Directiva Marco del Agua. Los ecosistemas de agua dulce han sufrido en los últimos 100 años muchas alteraciones como consecuencia del impacto de las infraestructuras hidráulicas (presas y azudes). Estas infraestructuras suponen barreras transversales en los cauces hídricos que constituyen obstáculos para el movimiento de diferentes especies piscícolas.

La medida generalmente aplicada para corregir dicha problemática es la construcción de pasos para peces, siendo las escalas de peces el paso más extendido. El diseño de escalas de peces y la evaluación de su eficiencia requieren un conocimiento detallado de la hidrodinámica de las escalas así como de un análisis profundo de las capacidades nataatorias de los peces.

En resumen, lo que ha perseguido la experimentación llevada a cabo en el Laboratorio de Hidráulica es poder dar unos criterios de diseño para las escalas que tengan en cuenta las capacidades nataatorias de los peces presentes en los ríos españoles.

2. LA ESCALA DE PECES DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

En el número 164 de Ingeniería Civil (Lara et al., 2011) se publicó un primer artículo sobre esta investigación. En el mismo se describe con detalle la escala de peces construida a tal efecto en la nave de ensayos del Laboratorio de Hidráulica y que puede verse en la figura 1.

La tipología de escala ensayada corresponde a la de hendidura vertical que consiste en un cierto número de estanques separados por paredes transversales donde el paso del agua de un estanque a otro se realiza a través de una abertura vertical a lo largo de toda la altura de la escala, desde

* Corresponding author: enrique.aramburu@cedex.es

¹ Laboratorio de Hidráulica del CEDEX, Madrid, España.

la solera hasta la superficie libre del agua. Dicha tipología ha sido ampliamente estudiada en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de la Coruña, donde se llevaron a cabo diversos ensayos hidráulicos para la caracterización del flujo en estas escalas (Teijeiro et al., 2006; Puertas y Pena, 2008a y 2008b).



Figura 1. Escala construida en el Laboratorio de Hidráulica.

También en el citado artículo de Ingeniería Civil se describieron los equipos e instrumentación instalada en la escala para el seguimiento de los movimientos de los peces, que resumiendo consisten en:

- Un sistema de radiofrecuencia para la localización e identificación de los peces durante la experimentación en la escala. Dicho sistema consiste en implantar un microchip (passive integrated transponder tag) en cada pez, de manera que al paso de los mismos por las proximidades de cuatro antenas colocadas a lo largo de la escala, el microchip interactúa electromagnéticamente con ellas, recibiendo el circuito lector asociado a cada antena el código único de identificación asignado a cada pez.

Con este sistema se obtiene la información en tiempo real en un ordenador de los movimientos de los peces durante los ensayos.

- Un sistema de 29 cámaras de video cenitales instaladas en los siete últimos estanques de la escala, así como sus respectivos videograbadores, que recogen las imágenes de los movimientos de los peces en estos estanques. Este sistema permite, mediante un tratamiento digital de las imágenes captadas, determinar la trayectoria que han seguido los peces (x,y,t), así como sus velocidades y aceleraciones, en su ascenso por la escala.
- Un sistema de 4 cámaras sumergibles de pequeño tamaño y alta resolución colocadas en cuatro estanques a lo largo de la escala con el fin de captar imágenes subacuáticas del comportamiento de los peces en los estanques (ver figura 2).

Por otra parte las especies autóctonas que se han ensayado en la escala de peces del Laboratorio de Hidráulica del CEDEX han sido: la trucha común (*Salmo trutta*), dentro de los salmónidos; y la boga del Tajo (*Pseudochondrostoma polylepis*), el barbo común (*Luciobarbus bocagei*) y el barbo del Mediterráneo (*Luciobarbus guiraonis*), estas tres especies correspondientes a los ciprínidos.

En cuanto a la procedencia de los ejemplares de las especies ensayadas ha sido en la mayoría de los casos de piscifactoría, siendo el origen de las truchas comunes la piscifactoría de Uña, en la provincia de Cuenca, las bogas del Tajo, la piscifactoría de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de Madrid, y los barbos del Mediterráneo proceden de la piscifactoría de Valdeganga, en la provincia de Albacete. Únicamente en el caso de los barbos comunes su obtención ha sido mediante pesca eléctrica en el río Cofio, en la provincia de Madrid.

En el mencionado artículo de Ingeniería Civil se comentó asimismo el protocolo de ensayos que se ha seguido durante la experimentación que, en resumen, pretende sistematizar y comparar los resultados de los ensayos llevados a cabo con los peces variando los caudales por la escala. Tal como se indicó en dicho artículo, los ensayos han durado 24 horas seguidas y en este tiempo se deja que los ejemplares asciendan de forma voluntaria la escala. También se indicó que los ensayos se han realizado respetando las épocas de reproducción de las distintas especies ensayadas: trucha común (diciembre-febrero), boga del Tajo (abril-mayo), barbo común y del Mediterráneo (mayo-junio)



Figura 2. Movimientos de bogas y barbos por la escala.

3. RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS CAMPAÑAS DE ENSAYOS

Antes de presentar los resultados que se han obtenido durante las tres campañas de ensayos realizadas, 2009-2010, 2010-2011 y 2011-2012, en la escala de peces del Laboratorio de Hidráulica del CEDEX, es necesario definir en primer lugar un criterio para evaluar el grado de eficiencia en el ascenso de las distintas especies por dicha escala.

Como criterio general para este estudio se ha considerado que la escala de hendidura vertical ensayada en el Laboratorio de Hidráulica del CEDEX ha permitido el ascenso de los peces por la misma, para una especie y una talla determinada, cuando al menos el 50 % del total de los ejemplares que se han puesto al pie de la escala al comienzo de los ensayos, en el conjunto de las tres campañas realizadas, ha ascendido la totalidad de la misma durante el tiempo máximo de ascenso considerado de 24 horas seguidas.

El porcentaje considerado del 50% se estima que es conservador dadas las especiales condiciones ambientales que se tienen dentro de la nave de ensayos del Laboratorio (luz, ruido, etc), así como a que se debe tener en cuenta el posible estrés de los peces debido a diversos factores (transporte, estabulación, etc), que implican en general unas peores condiciones que las naturales para remontar la escala.

Por otra parte también hay que tener en cuenta que, salvo en el caso de los barbos comunes, los peces proceden de piscifactoría y además de varias generaciones nacidas ya en cautividad, por lo que su instinto para remontar el río con fines reproductores y localizar zonas de freza óptimas se ha podido ver alterado.

A falta de realizar, en una fase posterior de esta experimentación, unos ensayos de comprobación en una escala

de similares características existente en un río, se considera que, probablemente, en dicha escala en la naturaleza los peces de las distintas especies remontarán en mayores porcentajes que los resultados obtenidos en la escala del Laboratorio.

3.1 Trucha común

Los resultados generales que se han obtenido de la experimentación con trucha común se resumen en la tabla 1.



Figura 3. Ejemplar ensayado de trucha común.

En primer lugar se indica que, durante la segunda campaña de ensayos realizada en la escala con truchas comunes (ensayos de fechas 27/01/2011, 03/02/2011, 10/02/2011 y 17/02/2011), las hembras de los ejemplares que se suministraron al Laboratorio habían desovado previamente en la piscifactoría de Uña y como consecuencia se encontraban muy debilitadas, no registrándose apenas ascensiones, por lo que no se han tenido en cuenta estos ensayos en los resultados globales de esta especie.

En la tabla 1 se observa que los ejemplares con tallas superiores a 10 cm han podido subir la escala del Laboratorio con el caudal más bajo de 100 l/s, mientras que solamente lo han podido hacer los ejemplares mayores de 25 cm con el caudal más alto de 250 l/s. Por otra parte, los resultados

Tabla 1. Ensayos de 24 horas con truchas comunes

Fecha Ensayo	Caudal Ensayo (l/s)	Nº Ejemplares ensayo / talla					Nº Ejemplares ascendidos / talla					% Subida / talla				
		10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35
28/01/2010	100		5	3	2		4	3	2			80	100	100		
27/01/2011	100			6	23	1		0	6	1		0	26	100		
17/02/2011	100			9	11	4		2	6	1		22	55	25		
15/12/2011	100	5	16	3			3	13	2		60	81	67			
12/01/2012	100	2	21	2			1	18	2		50	86	100			
	Total (*) ejemplares	7	42	8	2		4	35	7	2	57	83	88	100		
03/02/2010	250		11	8	1		4	5	1		36	63	100			
03/02/2011	250			12	12	1		4	2	0	33	17	0			
10/02/2011	250			6	16	2		2	6	0	33	38	0			
22/12/2011	250	2	13	4			0	1	1		0	8	25			
19/01/2012	250	3	19	2	1		0	1	0	1	0	5	0	100		
	Total (*) ejemplares	5	43	14	2		0	6	6	2	0	14	43	100		
26/01/2012	175		12	3				1	1		8	33				
02/02/2012	175	4	13	6			0	2	4		0	15	67			
	Total ejemplares	4	25	9			0	3	5		0	12	56			

(*) No se tienen en cuenta los resultados de la segunda campaña 2010-2011.

obtenidos sobre el porcentaje de ascenso de los ejemplares con un caudal intermedio de 175 l/s han sido muy parecidos a los del caudal de 250 l/s.

3.2 Boga del Tajo

Los resultados generales que se han obtenido de la experimentación con boga del Tajo se resumen en la tabla 2.



Figura 4. Ejemplar ensayado de boga del Tajo.

Los resultados de la experimentación con la boga del Tajo indican que esta especie tiene una menor capacidad natatoria que el resto de las especies ensayadas en la escala del Laboratorio, de manera que con el caudal más bajo de 100 l/s han ascendido los ejemplares con talla superior a 15 cm, mientras que solamente lo han podido hacer con el caudal más alto de 250 l/s los de tamaño superior a 20 cm (se hace la observación que no se ha podido disponer en los ensayos de un número mayor de ejemplares con tallas mayores de 20 cm).

En cuanto a los resultados registrados sobre el ascenso con un caudal intermedio de 175 l/s son inferiores a los

obtenidos con el caudal más alto de 250 l/s. No obstante estos resultados deberían comprobarse en futuras campañas de ensayos en la escala, dadas las diferencias que se observan según la semana en que se realizan los ensayos, así como el escaso número de ejemplares de tallas superiores a 15 cm puestos en la escala con este caudal.

3.3 Barbo común

Los resultados generales que se han obtenido de la experimentación con barbo común se resumen en la tabla 3.

Los resultados obtenidos en la escala del Laboratorio indican que esta especie tiene una mayor capacidad de ascenso respecto al resto de las especies ensayadas, de manera que los ejemplares con tamaños superiores a 10 cm han ascendido la escala con el caudal más bajo de 100 l/s y los de talla superior a 15 cm con el caudal más alto de 250 l/s.



Figura 5. Ejemplar ensayado de barbo común.

No se ha podido comprobar sin embargo el ascenso con un caudal intermedio, dadas las dificultades que se

Tabla 2. Ensayos de 24 horas con bogas comunes

Fecha Ensayo	Caudal Ensayo (l/s)	Nº Ejemplares ensayo / talla			Nº Ejemplares ascendidos / talla			% Subida / talla		
		10-15	15-20	20-25	10-15	15-20	20-25	10-15	15-20	20-25
08/04/2010	100	4	9	1	0	5	1	0	56	100
29/04/2010	100	1	20	1	0	14	0	0	70	0
24/03/2011	100	23	6	1	6	2	1	26	33	100
07/04/2011	100	18	8	1	0	5	1	0	63	100
28/04/2011	100	21	6		2	4		10	67	
12/04/2012	100	23	2		2	0		9	0	
17/05/2012	100	23			8			35		
	Total ejemplares	113	51	4	18	30	3	16	59	75
15/04/2010	250	5	9	3	0	1	1	0	11	33
06/05/2010	250	12	9		2	3		17	33	
31/03/2011	250	24	7	1	1	2	1	4	29	100
14/04/2011	250	14	10		0	2		0	20	
05/05/2011	250	13	12		1	6		8	50	
26/04/2012	250	22	3		3	3		14	100	
24/05/2012	250	20	4		1	0		5	0	
	Total ejemplares	110	54	4	8	17	2	7	31	50
19/04/2012	175	23	3		0	0		0	0	
10/05/2012	175	22	1		2	0		9	0	
	Total ejemplares	45	4		2	0		4	0	

Tabla 3. Ensayos de 24 horas con barbos comunes

Fecha Ensayo	Caudal Ensayo (l/s)	Nº Ejemplares ensayo / talla					Nº Ejemplares ascendidos / talla					% Subida / talla				
		10-15	15-20	20-25	25-30	>30	10-15	15-20	20-25	25-30	>30	10-15	15-20	20-25	25-30	>30
13/05/2010	100		1	1	1	17		0	0	0	15		0	0	0	88
22/07/2010	100	12	2				6	1				50	50			
09/06/2011	100				1	11				1	8				100	73
31/05/2012	100	2	15	1			1	12	1			50	80	100		
21/06/2012	100	12	5				10	5				83	100			
	Total ejemplares	26	23	2	2	28	17	18	1	1	23	65	78	50	50	82
20/05/2010	250					16					7					44
19/05/2011	250				1	11				0	4				0	36
07/06/2012	250	8	5	4	2		1	4	3	0		13	80	75	0	
14/06/2012	250	4	7	1		4	3	5	1		3	75	71	100		75
	Total ejemplares	12	12	5	3	31	4	9	4	0	14	33	75	80	0	45

han tenido para el suministro de ejemplares de esta especie de ciprínidos autóctona, cuya obtención únicamente se ha podido realizar mediante pesca eléctrica en el río Cofio.

3.4 Barbo del Mediterráneo

Los resultados generales que se han obtenido de la experimentación con barbo del Mediterráneo se resumen en la tabla 4.

Por su mayor facilidad de obtención, en comparación con los barbos comunes, se trajeron durante la segunda campaña de ensayos unos ejemplares de esta especie desde la piscifactoría de Valdeganga (Albacete), que corresponde a un tipo de barbo autóctono existente en las cuencas del Mediterráneo.

**Figura 6.** Ejemplar ensayado de barbo del Mediterráneo.

Su capacidad de ascenso ha sido menor que la del barbo común capturado en el río Cofio, de manera que para el caudal más bajo de 100 l/s han ascendido la escala los ejemplares de talla superior a 15 cm, y solamente los de tamaño superior a 20 cm con el caudal más alto de 250 l/s. Por otra parte con estos barbos se han obtenido algunos resultados no del todo congruentes con los del resto de las especies ensayadas respecto a los porcentajes de ascenso por caudal y tamaño.

4. CRITERIOS DE DISEÑO DE LAS ESCALAS DE HENDIDURA VERTICAL

En el artículo ya referido anteriormente de Ingeniería Civil se expusieron unos primeros criterios de diseño para esta tipología de escalas de hendidura vertical, plasmados en una aplicación informática (ver figura 10), con el objeto de relacionar las condiciones hidráulicas que se dan en la misma con las capacidades natatorias de los peces. Estos criterios se basan en dos condicionantes:

1. El pez tiene que tener la capacidad natatoria para atravesar la sección de mayor velocidad, que se produce en la zona de la hendidura. Esta primera limitación es absoluta, pues si el pez no logra pasar por la hendidura, no podrá remontar la escala.
2. Por otra parte el pez, suponiendo que no descanse en su ascenso por la escala, debe mantener una

Tabla 4. Ensayos de 24 horas con barbos del Mediterráneo

Fecha Ensayo	Caudal Ensayo (l/s)	Nº Ejemplares ensayo / talla					Nº Ejemplares ascendidos / talla					% Subida / talla				
		10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35
12/05/2011	100	10	6	2	2		0	3	0	0		0	50	0	0	
26/05/2011	100	5	5	4			1	4	2			20	80	50		
	Total ejemplares	15	11	6	2		1	7	2	0		7	64	33	0	
02/06/2011	250	6	6	5	1		0	0	4	1		0	0	80	100	
28/06/2012	250		2	6	10	1		0	2	2	0		0	33	20	0
	Total ejemplares	6	8	11	11	1	0	0	6	3	0	0	0	55	27	0

velocidad media que le permita recorrer el flujo principal que se produce a lo largo de los distintos estanques.

El primer condicionante depende de la velocidad existente en la hendidura, que es la máxima velocidad a la que se enfrenta el pez en su ascenso por la escala, mientras que, para el segundo condicionante, ha de estimarse una velocidad promedio del flujo principal que debe recorrer el pez suponiendo que no realiza descansos. En el citado artículo se estimaba esta velocidad promedio en un porcentaje del 90% de la velocidad existente en la hendidura.

Por otra parte, las capacidades natatorias de los peces de las distintas especies se representan por medio de unas curvas llamadas “*velocidad del agua – autonomía del pez*”. Estas curvas han sido obtenidas por distintos investigadores extranjeros mediante unos ensayos realizados en un canal a cielo abierto o en un conducto cerrado (respirómetro o cámara de natación). Dichas curvas relacionan la velocidad de la corriente con la máxima longitud que se deduce

del tiempo en el que el pez, de una cierta talla, aguanta sin dejarse arrastrar por la velocidad de la corriente.

También se indicó en el referido artículo que, por el momento, estas curvas no han sido obtenidas para las especies presentes en nuestros ríos, por lo que únicamente se dispone de unas curvas que proceden de un trabajo de recopilación de diferentes fuentes bibliográficas, llevado a cabo por un equipo del Departamento de Zoología y Antropología Física de la Universidad Complutense de Madrid, que obtuvieron unas primeras aproximaciones para salmónidos y ciprínidos (Elvira et al., 2008a y 2008b).

Si se representan, en estas curvas obtenidas para salmónidos y ciprínidos, los dos condicionantes que se han indicado anteriormente, para el caso de la escala del Laboratorio de Hidráulica, y según las tallas de los ejemplares utilizados en los ensayos llevados a cabo, los resultados aparecen reflejados en las figuras 7 y 8. El primer condicionante se representa mediante un punto en azul, mientras que el segundo es el punto rojo que aparece.

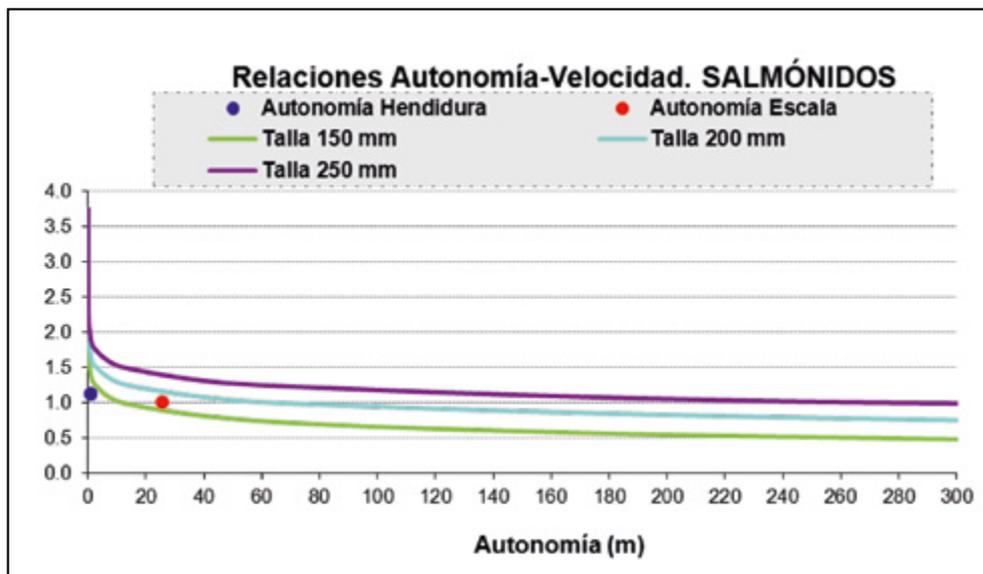


Figura 7. Salmónidos. Relaciones Autonomía-Velocidad.

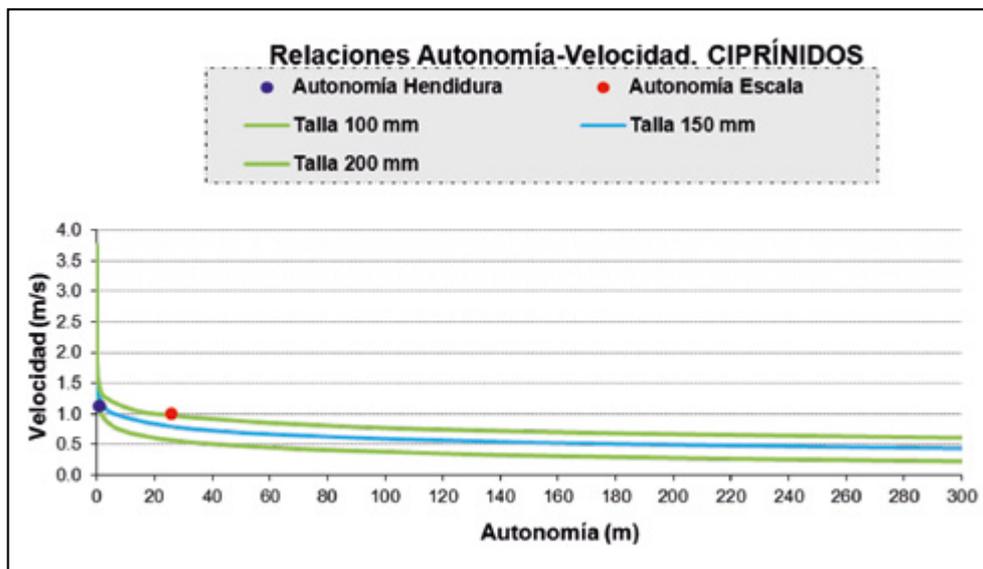


Figura 8. Ciprínidos. Relaciones Autonomía-Velocidad.

indicadas, dicha velocidad promedio en el flujo principal con los valores que figuran en la tabla para un caudal de 100 l/s.

Tabla 5. Valores del coeficiente C

Especie	Coeficiente C	
	Caudal 100 l/s	Caudal 250 l/s
Salmónidos		
Trucha común	0,9	1
Ciprínidos		
Boga del Tajo	0,8	1
Barbo común	0,5	0,8
Barbo del Mediterráneo	0,8	1

Finalmente estos valores del coeficiente C deben de tenerse en cuenta si se utiliza la aplicación informática diseñada por la Escuela de Ingenieros de Caminos de la Universidad de la Coruña, muy útil para los proyectistas, que se basa en los criterios de diseño que se han expuesto anteriormente para las escalas de hendidura vertical, y que aparece en la figura 10.

5. CONCLUSIONES

Como conclusiones generales de los resultados que se han obtenido en las tres campañas de ensayos llevadas a cabo en la escala de peces del Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, con una

tipología de escala de hendidura vertical, se pueden extraer las siguientes:

- El caudal que fluye por la escala ha sido una variable fundamental en la proporción de peces, de todas las especies ensayadas, que han sido capaces de remontar la totalidad de la escala, de manera que han ascendido en mayor proporción con el caudal más bajo ensayado de 100 l/s, en comparación con el caudal más alto de 250 l/s. Aunque los estudios hidráulicos realizados por diversos investigadores, para esta tipología de escalas de hendidura vertical, indican que las velocidades en la hendidura y, por tanto, en el flujo principal, no varían sensiblemente con el caudal para una geometría determinada, la mayor turbulencia asociada a los caudales más altos se considera que es un factor que afecta considerablemente a los peces, lo que hace que estén en peores condiciones para ascender la escala.
- Se han obtenido, por otra parte, resultados diferentes en cuanto al porcentaje de ascenso que han tenido los peces según la especie analizada, siendo los barbos comunes los que han tenido un mayor porcentaje de subida en comparación con el resto de las especies. No obstante, es necesario indicar que precisamente los barbos comunes son los únicos que proceden de río y no de piscifactoría, por lo que este origen puede también explicar las diferencias observadas, dado que presumiblemente los peces criados en cautividad tienen un menor instinto para remontar un río.

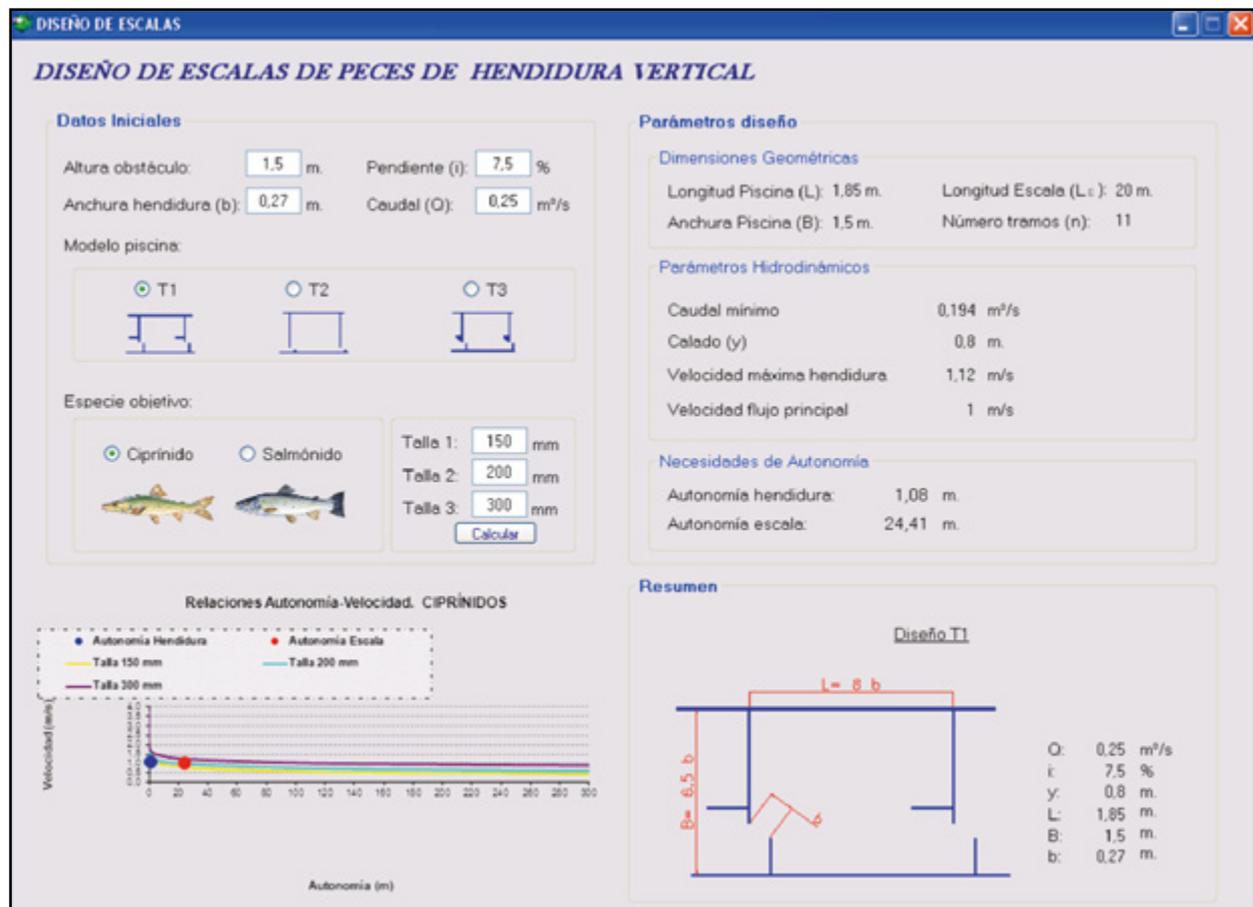


Figura 10. Aplicación para el diseño de escalas de hendidura vertical.

- Asimismo se ha comprobado que los peces de todas las especies ensayadas nunca han remontado la escala de forma continua, sino que van ascendiendo de un estanque al siguiente realizando previamente descansos de duración variable en las zonas de recirculación existentes a cada lado del flujo principal.
- Los criterios de diseño para esta tipología de escalas de hendidura vertical deben de tener en cuenta, por una parte, el paso obligado del pez por la hendidura (si el pez no puede superar la velocidad del agua existente en la hendidura, no podrá ascender por la escala), y por otra parte, que el pez va subiendo los distintos estanques de la escala realizando descansos en las zonas de recirculación existentes a cada lado del flujo principal. Sin embargo, respecto a esto último, no es razonable pensar que el pez pueda remontar un número indefinido de estanques en la escala puesto que, aunque descanse, realiza un esfuerzo progresivo y va fatigándose, lo que puede provocar, alcanzada una situación de total agotamiento, que el pez se deje arrastrar hacia aguas abajo por el flujo principal.
- Para determinar el nivel de agotamiento que tienen los peces al llegar al final de la escala del Laboratorio de Hidráulica del CEDEX, y con el objetivo de poder extrapolar los resultados a otras escalas, se han medido algunos parámetros fisiológicos en sangre de los peces (por ejemplo, lactato), cuyos resultados deben todavía ser complementados con la obtención de estos parámetros en músculo para tener unas conclusiones sobre el esfuerzo de los peces para remontar la escala.
- Las condiciones hidráulicas del flujo existentes en la escala de hendidura vertical pueden relacionarse con las capacidades natatorias de los peces mediante el empleo de unas curvas llamadas “*velocidad del agua-autonomía del pez*” que han sido obtenidas mediante una síntesis de estudios realizados por diversos investigadores extranjeros para las especies de ciprínidos y salmónidos. Estas curvas, que indican la máxima distancia que puede recorrer un pez para una determinada velocidad de la corriente, son obtenidas en canal abierto o conducto cerrado (respirómetro o cámara de natación).
- El primero de los condicionantes, el paso del pez por la hendidura, se puede contrastar con dichas curvas y comprobar que, para una talla del pez determinada, la velocidad del agua que representa el paso por la hendidura permite pasar al mismo. Sin embargo el segundo de los condicionantes, el recorrido del pez por la escala, no está del mismo modo relacionado tal y como se ha podido comprobar en la escala del Laboratorio. Como se ha indicado anteriormente, los peces van descansando en los estanques, es decir, no hacen un recorrido continuo, lo que explicaría, por ser más conservador, que peces de ciertas tallas que no habrían podido remontar según las referidas curvas de “*velocidad del agua-autonomía del pez*”, sí lo han hecho en la escala del Laboratorio.
- No obstante, el grado de conservadurismo que se tiene si se mantiene dentro de los criterios de diseño este segundo condicionante, el del ascenso del

pez sin descanso por la escala, se contrarresta prácticamente con el efecto del caudal. Efectivamente, según los porcentajes obtenidos de ascenso en las tres campañas de ensayos realizadas en la escala del Laboratorio de Hidráulica con las distintas especies, y de acuerdo con el criterio general que se ha propuesto para considerar que una cierta talla de pez ha podido ascender dicha escala, se ha obtenido un coeficiente C corrector por caudal y especie para utilizar las curvas “*velocidad del agua-autonomía del pez*” actualmente existentes.

- En definitiva, mientras no se obtengan las mencionadas curvas “*velocidad del agua-autonomía del pez*” para cada una de las especies de trucha común, boga del Tajo, barbo común y del Mediterráneo presentes en nuestros ríos, pueden seguirse utilizando las actuales para ciprínidos y salmónidos, así como, del lado de la seguridad (dentro del rango de los caudales ensayados), la aplicación informática que se cita en este artículo, con el objeto de tener en cuenta los dos criterios de diseño que se han indicado anteriormente para las escalas de hendidura vertical.
- Finalmente es preciso señalar que será necesario comprobar, en una fase posterior de este trabajo, los resultados obtenidos durante la experimentación en la escala del Laboratorio de Hidráulica del CEDEX, con unos ensayos en una escala de similares características existente en un río.

6. AGRADECIMIENTOS

Este proyecto de investigación se enmarca dentro de la colaboración entre la Dirección General del Agua del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente y el CEDEX.

Se agradece la colaboración prestada por los equipos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de la Coruña, en la puesta a punta y tratamiento de imágenes del sistema de cámaras instalado en la escala para el seguimiento de la trayectoria de los peces, así como la colaboración prestada por el Departamento de Ingeniería Forestal de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid, en todos los trabajos relacionados con la adecuada estabulación de los peces en su piscifactoría y la aportación de ejemplares de boga del Tajo para los ensayos.

Los ejemplares que se han utilizado de trucha común han sido proporcionados por la Consejería de Agricultura y Medio Ambiente de la Junta de Castilla la Mancha a quien se agradece su aportación. Del mismo modo se agradece a la Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid la autorización para la obtención de ejemplares de barbo común en aguas del río Cofio.

Finalmente también agradecer a José Luis García Ramos, encargado de la instrumentación de la escala de peces, a Ángel Gómez Salinas por su inestimable ayuda durante los ensayos, y en general a todo el personal de construcción y talleres del Laboratorio de Hidráulica del CEDEX por su dedicación a este trabajo.

7. REFERENCIAS

- Elvira, B., Almodóvar, A., Nicola, G., Ayllón, D., Parra, I. y Almeida, D. 2008a. Modelos de velocidades de natación crítica y curvas de velocidad-autonomía en ciprínidos. Informe interno elaborado para el Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX).
- Elvira, B., Almodóvar, A., Nicola, G., Ayllón, D., Parra, I. y Almeida, D. 2008b. Modelos de velocidades de natación crítica y curvas de velocidad-autonomía en salmónidos. Informe interno elaborado para el Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX).
- Lara, A., Aramburu, E., Berges, J.A., Morcillo, F, y Castillo, M. 2011. Investigación sobre el comportamiento de escalas de peces en laboratorio. Campaña de ensayos 2009-2010. Ingeniería Civil nº 164. CEDEX.
- Pena, L., Puertas J., Miguélez, M., Balairón; L., Lara, A. y Aramburu, E., 2009. Aplicación informática para el diseño de escalas de peces de hendidura vertical. Comunicación presentada en las Jornadas de Ingeniería del Agua JIA 2009, Madrid, 27 – 28 Octubre 2009. International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, Madrid.
- Puertas, J., y Pena, L. 2008a. Hidráulica de escalas de ranura vertical. Estado del conocimiento. Nota técnica para el Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX).
- Puertas, J., y Pena, L. 2008b. Estudio experimental en modelo reducido de escalas de peces de ranura vertical. Nota técnica para el Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX).
- Puertas, J. y Pena, L. 2008c. Criterios de diseño de escalas de peces de ranura vertical. Nota técnica para el Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX).
- Teijeiro, T., Puertas, J., Pena, L., y Peña, E. 2006. Evaluating vertical-slot fishway designs in terms of fish swimming capabilities. *Ecological Engineering* 27(1):37-48.7.