

DISPOSITIVOS DE REMONTE PARA PECES: ESCALAS DE HENDIDURAS VERTICALES

L. Pena Mosquera, J. Puertas Agudo, T. Teijeiro Rodríguez, y E. Peña González

Resumen:

La libre circulación de las poblaciones piscícolas a lo largo de la red hidrográfica es una necesidad imperiosa para la conservación de las especies migradoras. La infranqueabilidad física de los obstáculos de origen antropogénico es lo que se conoce como efecto barrera. Una de las posibles soluciones para lograr la conectividad longitudinal de los ríos es la construcción de dispositivos de remonte. Existe una gran variedad de tipologías de dispositivos de franqueo. Una de las tipologías más interesantes por sus características hidráulicas son las escalas de hendiduras verticales (EHV). Se realizó un estudio exhaustivo en modelo reducido de la hidrodinámica de dos diseños de piscinas de EHV. Se establecieron las relaciones caudal-calado, la configuración de los campos de velocidades y los patrones de flujo. Se estudiaron las relaciones entre los caudales experimentales y las velocidades en la piscina y se cuantificaron las velocidades en una sección especialmente crítica como la hendidura. Finalmente se estableció una metodología para realizar una evaluación de la idoneidad de las EHV en función de parámetros hidráulicos (velocidades y calados) y parámetros biológicos (velocidades de natación, talla del individuo).

Palabras clave: Escalas para peces; escalas de hendidura vertical; modelos hidráulicos; ecuaciones caudal-calado; patrones de flujo; campos de velocidades; relaciones velocidad-caudal; idoneidad biológica.

INTRODUCCIÓN

Las obras hidráulicas como presas, azudes, diques y otros obstáculos artificiales de menor entidad constituyen actuaciones imprescindibles para el aprovechamiento de los recursos hídricos, pero producen importantes cambios en las características físicas de los ríos, lo que origina graves consecuencias sobre el ecosistema fluvial. Se pueden citar, entre otras: cambios en la temperatura del agua, variación en los patrones estacionales del flujo, condiciones de anoxia del agua, desaparición de refugios ante los depredadores, pérdida de la diversidad de los hábitats, rotura de la conectividad longitudinal, etc. (Clay, 1995; Elvira, 1998; Cowx, 1998).

La libre circulación de las poblaciones piscícolas a lo largo de la red hidrográfica es una necesidad imperiosa para la conservación de las especies migradoras. Uno de los más importantes efectos directos de la construcción de presas sobre la ictiofauna continental es que constituyen una barrera física (Tabla 1) para los movimientos naturales de los peces a lo largo del curso fluvial (Larinier, 1998).

La infranqueabilidad física de estos obstáculos de origen antropogénico es lo que se conoce como *efecto barrera*. Como consecuencia del establecimiento de estos obstáculos llega a producirse el fraccionamiento de las poblaciones holobióticas y la pérdida de territorio fluvial de los migradores diadromos (Nicola, 1996).

¹ E.T.S. Enxeñeiros de Camiños, Canais e Portos. Universidade da Coruña. Campus de Elviña, s/n 15071, A Coruña. Telf. 981 167 000. Fax: 981 167 179; Ext. 2628 lpena@udc.es; Ext. 1430 jpuertas@udc.es; Ext. 1444 epena@udc.es

² E.P.S Enxeñeiros Agrónomos e de Montes. Universidade de Santiago de Compostela. Bernardino Pardo Ouro s/n. Lugo. 27002. Telf 981 56 31 00 Ext 23250. Correo-e: ttrep@s@lugo.udc.es

Tabla 1. Longitud total y longitud de los tramos accesibles en los principales ríos de Galicia. Tipo de obstáculo limitante (Pena, 2004).

Río	Obstáculo	Long Total	Tramo Accesible	
		Km	Km	%
EO	Natural	92.2	73.4	79.6
RODIL	Natural	36.2	9.2	25.4
MASMA	Natural	52.7	26.4	50.1
OURO	Natural	37.3	27.1	72.6
LANDRO	Natural	33.4	19.2	57.3
BRAVOS	-	17.1	13.0	75.7
SOR	-	58.0	52.5	90.5
MERA	-	34.4	21.7	63.1
XUBIA	Natural	35.8	18.0	50.3
BELELLE	Natural	23.6	3.9	16.5
EUME	Artificial	87.2	14.6	16.7
LAMBRE	-	26.5	23.0	86.8
MANDEO	Natural	59.2	15.0	25.3
MENDO	Artificial	31.9	16.5	51.7
MERO	Artificial	47.5	10.5	22.1

Río	Obstáculo	Long Total	Tramo Accesible	
		Km	Km	%
ANLLÓNS	Natural	59.5	14.6	24.5
G. DE BAIÓ	Artificial	41.9	8.0	19.1
CASTRO	Artificial	35.7	0.3	0.8
XALLAS	Natural	62.5	0.0	0.0
TAMBRE	Artificial	139.3	8.9	6.4
ULLA	Artificial	153.4	84.0	54.8
DEZA	Artificial	63.2	18.1	28.6
UMIA	Natural	69.9	29.4	42.0
LÉREZ	Natural	58.0	25.3	43.5
ALMOFREI	Natural	27.0	5.4	20.0
VERDUXO	Natural	38.0	9.3	24.5
OITAVÉN	Artificial	32.6	8.1	24.8
MIÑO	Artificial	322.6	78.0	24.2
TEA	Natural	56.4	37.5	66.4
DEVA	Natural	24.3	4.5	18.5
TOTAL		1857	675	36

La proliferación de obras transversales en los cursos fluviales gallegos y en el resto de la península supone un grave peligro para nuestros ecosistemas acuáticos continentales, siendo los efectos negativos especialmente sensibles en la ictiofauna migradora. Como dato significativo, en Galicia, las capturas deportivas de salmones se han reducido drásticamente en las últimas décadas, pasándose de aproximadamente 1200 ejemplares capturados en 1975 a menos del centenar en la temporada 2004.

El diseño de sistemas de franqueo de obstáculos efectivos, además de ser una actuación imperativa dentro del marco legislativo actual, es una de las claves para mantener la salud del medioambiente acuático (Odeh, 1999) ya que contribuye innegablemente a conservar la riqueza natural de nuestros ríos.

Conocer las diversas tipologías y características de los diferentes sistemas de franqueo de obstáculos es un primer paso para acercarnos a la consecución de esta importante tarea de la bioingeniería.

DISPOSITIVOS DE FRANQUEO DE OBSTÁCULOS

El efecto barrera producido por una obra hidráulica transversal puede corregirse de diversas maneras, entre las cuales debe ser considerada la demolición o la no construcción de la obra. Una solución alternativa, que nunca paliará de forma total todos los efectos negativos de este tipo de construcción hidráulica, es la instalación de dispositivos de franqueo de obstáculos.

Los dispositivos de franqueo se pueden definir, de una forma sencilla, como aquellas infraestructuras hidráulicas cuya finalidad es el paso de los peces migradores de un lado al otro de un obstáculo existente en el curso fluvial. Los dispositivos de franqueo deben conseguir la conectividad longitudinal del sistema hídrico y garantizar tanto la migración de remonte como las migraciones de descenso. Existen infraestructuras específicas para cada una de estos dos tipos de migración, en el presente artículo nos centraremos en los sistemas de remonte.

Generalidades en la implantación

El principio general de los dispositivos de franqueo consiste en atraer a los migradores a un punto determinado del río aguas abajo del obstáculo a franquear e incitarlos a pasar aguas arriba por medio de la abertura de una vía de agua, o concentrándolos para atraparlos y más tarde liberarlos aguas arriba del obstáculo.

Existen en el momento de la implantación numerosos condicionantes medioambientales que influyen directamente en la eficacia de los dispositivos de franqueo, sin embargo la influencia de la mayor parte de estos parámetros sobre el comportamiento de las especies migradoras está mal documentada por lo que es difícilmente traducible en criterios de dimensionamiento (Larinier, 1998). A la hora de la construcción de una obra de paso es necesario tener en cuenta los factores que se relacionan en la Tabla 2. En esta misma tabla se incluye un resumen de las principales causas del incorrecto funcionamiento de los dispositivos de franqueo.

Tabla 2. Factores de implantación y causas habituales del funcionamiento deficiente de dispositivos de remonte de obstáculos (Pena, 2004).

Factores de Implantación		Causas Comunes de Funcionamiento Deficiente	
Biológicos	Especies migradoras, ciclos biológicos, estacionalidad de los movimientos migratorios, capacidades de natación y salto, preferencias de luminosidad, temperatura...	Ausencia de Llamada	Mala localización, caudal insuficiente
	Niveles da agua, variación estacional de caudales, caudales a pie de obra...	Mala altimetría	Fuerte salto en la entrada, infra/supra alimentación de la obra, desconocimiento de los niveles de agua.
Hidrológicos	Velocidad del flujo, variaciones del calado, relaciones caudal-calado, turbulencia, pendientes, geometría de la obra...	Dimensionamiento defectuoso	Volumen reducido de depósitos, aireación y turbulencia excesiva, salto entre depósitos elevado, profundidad de agua insuficiente.
Hidráulicos	Batimetría del lecho, situación de la obra, topografía de las riberas, existencia de pozas a la entrada y salida del paso...	Colmatación o bloqueo	Mala protección contra cuerpos a la deriva, entrada muy expuesta, defectos de mantenimiento, mala alimentación.
		Deficiente regulación del caudal	Alteración de la llamada derivada de la gestión del agua en las turbinas y compuertas.
		Causas Externas Variables	Mal funcionamiento de los órganos mecánicos como compuertas, reguladores de caudal, tornos de maniobra de jaulas, etc...

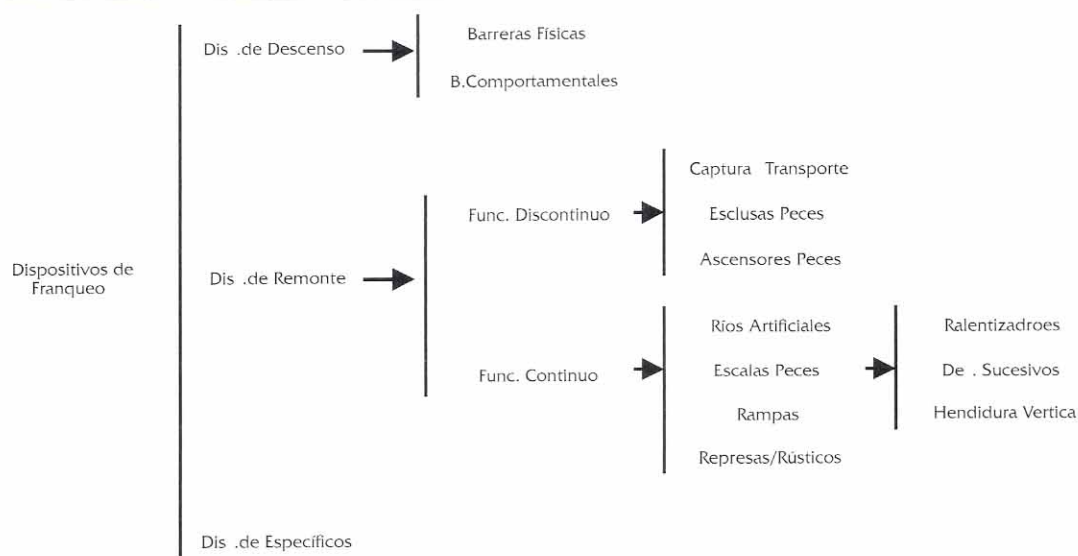


Figura 1. Tipologías de los dispositivos de franqueo.

Las condiciones hidrodinámicas establecidas una vez implantado el dispositivo de paso serán consideradas eficaces cuando permitan que *los peces puedan encontrar fácilmente la entrada, atravesar el paso sin retrasos, estrés o heridas y finalmente alcanzar la salida para poder continuar su migración.*

El efecto llamada (es decir, la atraktividad del paso para los migradores) está ligado a: la situación, la orientación, y la cantidad de movimiento (caudal y velocidad) en la entrada del dispositivo. La atracción de la entrada será mayor cuanto mayor sea el porcentaje de caudal que circule por los dispositivos, se admite como dato general que los

caudales que transitan en los dispositivos de salto sean de aproximadamente 1-5% del caudal del río. Se recomienda adoptar como velocidad mínima en la entrada un valor de 1 m/s, considerándose velocidades óptimas para salmónidos del orden de 2-2,4 m/s.

Tipologías de los dispositivos

Los dispositivos de franqueo para el remonte de los migradores pueden ser divididos según su funcionamiento en dispositivos discontinuos y dispositivos continuos (Figura 1). Existen además dispositivos de remonte específicos para ciertas especies migradoras como las anguilas.

Dipositivos de remonte discontinuos

Dentro de este tipo de dispositivos se encuadran los ascensores y las esclusas para peces, así como los sistemas de captura y transporte (*trapping and trucking*). La principal característica radica en que son dispositivos donde los peces son *pasivamente* transportados (OTA, 1996) a diferencia de las escalas de peces clásicas en las cuales el pez debe realizar un trabajo de natación activo para remontar el obstáculo. Otra diferencia importante es la discontinuidad de su actividad derivada de un funcionamiento cíclico, lo que implica trastornos en el remonte natural de los peces. Esta diferencia con un paso clásico se convierte también en su mayor inconveniente, ya que el sistema es *atractivo* solamente en una fase de tiempo muy limitado, por lo que el pez presente a pie de obstáculo puede dejar la zona antes de que el ciclo retorne a una fase de atracción (Larinier, 1998).

La principal ventaja de la instalación de un dispositivo discontinuo reside en su coste prácticamente independiente de la altura del obstáculo a franquear.

Dipositivos de remonte continuos

Rampas para peces

Se denominan rampas para peces a aquellos dispositivos conformados en forma de rampa que se sitúan a continuación del obstáculo, hacia río abajo. Con la utilización de estos sistemas en pendiente lo que se pretende es: eliminar el salto de agua al repartirlo a lo largo de toda la rampa e integrarlos efectivamente dentro del ecosistema fluvial.

Una de las principales ventajas de estos pasos es que el dispositivo está instalado sobre el propio lecho del río lo que las hace fácilmente *encontrables* por los migradores (Cowx, 1998); por otro lado se integran óptimamente dentro del ecosistema fluvial

Ríos artificiales

Los ríos artificiales son sistemas formados por un canal de baja pendiente (menor del 5%) que uniendo la zona aguas arriba del obstáculo con la zona aguas abajo *paralelamente* al cauce principal, intenta imitar una corriente natural. Dentro del dispositivo se recrean las condiciones naturales de pendiente, caudal y substrato, utilizando materiales similares a los de la cuenca, intentando

integrar completamente el dispositivo en la zona. Estas estructuras están siendo ampliamente utilizadas después del éxito alcanzado en Europa en su utilización en pequeñas presas siendo previsible que en los próximos años, este dispositivo de salto más ecológico sea frecuentemente utilizado.

Además de la ventaja de una buena adaptación a las condiciones paisajísticas de la zona este tipo de obra permite una utilización multiusos. Uno de los inconvenientes es que su funcionamiento óptimo se reduce a un pequeño rango de calado aguas arriba así como la alta sensibilidad a las variaciones del nivel aguas abajo (Odeh, 2000). También debe tenerse en cuenta que la baja pendiente implicará una gran necesidad de espacio y problemas de atracción de los migradores.

Escalas de depósitos sucesivos

Las escalas de depósitos sucesivos son los dispositivos con más amplia difusión en el mundo (Clay, 1995). Consisten, de forma general, en un canal en pendiente dividido por tabiques transversales de diferentes diseños que conforman una serie de depósitos o piscinas sucesivas (Figura 2).

Las escalas de depósitos sucesivos son susceptibles de adaptarse con relativa facilidad a las obras hidráulicas ya existentes; esta característica junto con la posibilidad de soportar cambios de dirección (incluso giros bruscos de 180°) las convierte en una de las mejores soluciones al franqueo de obstáculos. Por otro lado, es un paso mucho menos selectivo que las escalas de ralentizadores, es decir, ofrece mejores condiciones cuando existen varias especies migradoras (salmones, reos, truchas, ciprínidos) en el curso fluvial. Las pendientes medias utilizadas en este tipo de dispositivo oscilan alrededor del 10% (OTA, 1995; Bell, 1984).

Escalas de ralentizadores

Las escalas de ralentizadores son dispositivos de franqueo que derivan de un modelo original puesto en funcionamiento por un bioingeniero belga, G. Denil. La idea consistía en un canal rectilíneo en pendiente dividido por una serie de separadores (deflectores o ralentizadores) colocados próximos unos a otros (Figura 2). Estos ralentizadores crean unas contracorrientes con velocidades opuestas al flujo principal que aumentan la disipación de energía a la vez que *impulsan* a los peces en su viaje de remonte.

El flujo turbulento asociado a estas escalas reduce la sedimentación en el interior de la escala así como provee una gran capacidad de atracción, por contra el mal funcionamiento debido a la colmatación por cuerpos flotantes es un problema comunmente asociado a este tipo de escala. Para la pendiente de la escala se utilizan valores comprendidos en el rango entre 10-25% (Katopodis, 1992).

ESCALAS DE HENDIDURA VERTICAL

Las primeras escalas de peces de hendidura vertical fueron desarrolladas para su construcción en los rápidos del Hell's Gate en el río Fraser, Canadá, a través de estudios sobre modelo reducido (Clay, 1995). Las escalas de hendidura vertical consisten en un canal rectangular en pendiente dividido en un cierto número de depósitos mediante tabiques transversales que poseen una hendidura vertical a lo largo de toda la altura. Debido a la escotadura vertical, los depósitos no están claramente delimitados.

El agua discurre a través de la hendidura de

una piscina hacia la siguiente (Wu, 1999) hasta alcanzar el río, aguas abajo del obstáculo. La diferencia entre los niveles aguas arriba y aguas abajo se divide en un cierto número de pequeños saltos (Rajaratnam, 1986).

A partir del modelo original que constaba de doble hendidura, se construyeron en todo el mundo dispositivos similares basado en el mismo principio, la mayoría de las veces provistos de una sola hendidura.

La geometría de las ranuras y las dimensiones de los depósitos pueden variar sensiblemente de una instalación a otra. Así pueden existir diferentes tipos de escalas de hendidura vertical según tengan o no deflectores laterales, con simple o doble hendidura, con zócalo en la solera de la hendidura, con deflectores longitudinales cortos asociados a los tabiques transversales principales, etc. Sin embargo a partir de estudios efectuados en Francia sobre modelo se recomiendan longitudes de depósito del orden de 8-10 veces la longitud de la hendidura (9-10 veces para escalas de doble hendidura) y anchuras de depósito de 6-8 veces la longitud de la hendidura.

Tabla 3. Características principales de diferentes modelos de escalas de peces de hendidura vertical.

Esc. Hendidura Vertical	Hendidura	Long.	Anch.	Pte.
Hell's Gate Superior (Clay, 1995)	0.305 m	3.05 m	2.75 m	(10%)
Hell's Gate Principal (Clay, 1995)	0.73 m	5.5 m	6.1 m	(5.45%)
Moricetown Falls (Clay, 1995)	0.305	3.05 m	1.83 m	(10%)
Farwell Canyon (Clay, 1995)	0.305	3.05 m	1.83 m	(10%)
Bazacle (Larinier, 1998)	0.40 m	3.70 m	2.50 m	(8,10%)
Ramier du Chateau (Larinier, 1998)	0.50 m	4.50 m	2.50 m	6.33%
Belleville (Larinier, 1998)	0.60 m	4.40 m	5.00 m	(6.81%)
Bergerac (Larinier, 1998)	0.55 m	4.50 m	6.00 m	6.7%
Mauzac (Larinier, 1998)	0.45 m	3.80 m	2.80 m	(7.9%)
Vichy (Larinier, 1998)	0.50 m	4.50 m	2.50 m	(6,66%)
Ben Anderson e Kolan Barrages (Odeh, 2000)	0.15 m	1.5 m	2.4 m	6.7%

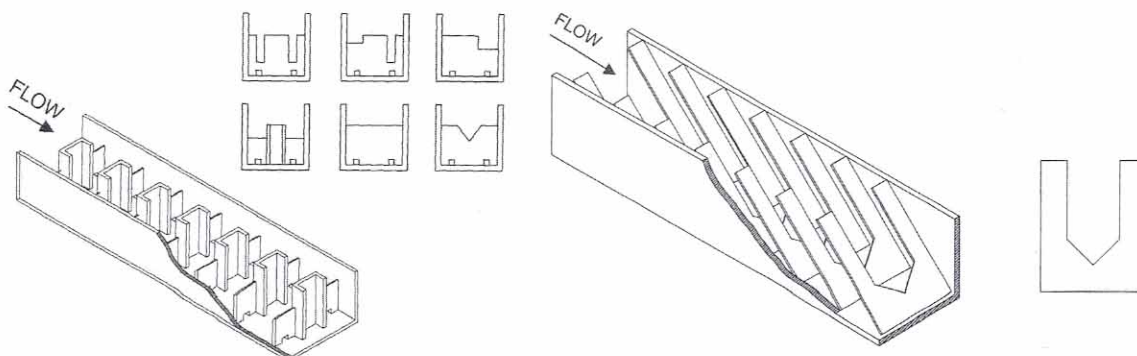


Figura 2. Izquierda: Escalas de depósitos sucesivos; diferentes configuraciones de los tabiques transversales que conforma las piscinas (1). Derecha: Esquema de una escala de ralentizadores planos tipo Denil (Odeh, 1999).

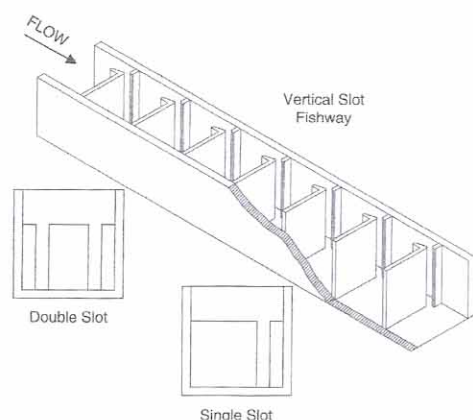


Figura 3. Izquierda: Escala de hendidura vertical, diferentes configuraciones de los tabiques que conforman las piscinas: de simple o de doble hendidura (Odeh, 1999). Derecha: Escala de peces de hendidura vertical en Francia, escala de Méricourt en el río Seine (Larinier, 1998).

En algunos casos se instala un pequeño zócalo o umbral ("sill") en la base de la hendidura (Clay, 1995, Larinier, 1998) con un doble propósito: mejorar el guiado del chorro en diagonal sobre el depósito (evitando el cortocircuitado del flujo) y limitar el caudal necesario en el dispositivo.

Las escalas de hendidura vertical son frecuentemente usadas para obstáculos de poca altura y en obstrucciones naturales donde los caudales son incontrolables o sufren grandes variaciones. Una de las grandes ventajas de las EHV es su adaptabilidad a las variaciones de nivel, permaneciendo estable su funcionamiento hidráulico. Otras características ventajosas de las EHV son: las zonas de descanso que proporcionan a los migradores en su ascenso, la posibilidad de que los peces elijan la profundidad de natación según las condiciones de luz, turbidez, etc, y el camino de ascenso no tortuoso que facilita su recorrido por el dispositivo.

EXPERIMENTACIÓN EN MODELOS HIDRÁULICOS

La mayoría de los criterios de diseño utilizados en los proyectos de construcción de dispositivos de franqueo provienen de la investigación y de la experiencia adquirida en otras partes del mundo, especialmente en países como Francia, EEUU o Canadá. Dicha investigación se dirige en dos direcciones: una vía de investigación hidráulica (velocidades, caudales, niveles de turbulencia, efecto llamada, calados, líneas de flujo, etc); y una vía de investigación biológica (capacidades de

natación y salto de los migradores, velocidades máximas, tiempo de extenuación, etc). El traslado de dicha experiencia no siempre es directa ya que debe ser adaptada a los condicionantes que imponen ecosistemas diferentes.

La construcción de dispositivos de franqueo verdaderamente eficaces, estos es, dispositivos que no solo se limiten a cumplir los requisitos que establece la normativa legal, sino que realmente sean un instrumento para mejorar la situación de las especies migradoras en el ecosistema acuático continental, precisa de una herramienta de gran utilidad: la investigación en modelos hidráulicos.

La caracterización experimental en modelo reducido de los dispositivos de franqueo que se pretendan construir, nos permitirá conocer *a priori* la hidrodinámica, lo que aumentará de forma significativa las probabilidades de éxito en la implantación de la obra evitando errores de alto coste económico.

Objetivos

Se establecieron tres objetivos principales en el presente estudio. El primer objetivo marcado es establecer una metodología experimental con un sistema de medida fiable, riguroso y de sencilla utilización. Una vez logrado este objetivo se estudiarán hidráulicamente dos diseños de escalas de peces de hendidura vertical (diseño T1 y diseño T2; Figura 4) mediante la evaluación sistemática de velocidades y calados lo que nos permitirá la caracterización del flujo (ecuaciones caudal-calado, distribución de los calados, evolución

de los campos de velocidades, velocidades en la hendidura, zonas de recirculación) para un amplio espectro casuístico. Un tercer objetivo consiste en implementar una metodología de evaluación que nos permita una aproximación a la idoneidad de los diseños estudiados en función de variables hidráulicas y biológicas (relacionadas con la capacidad de natación).

Metodología Experimental

En el Laboratorio de Hidráulica del CITEEC (Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil) perteneciente a la Universidad de A Coruña se comienza en el año 2000 un proyecto de investigación (CICYT-HID-1999-0297) para la caracterización experimental de escalas de peces de hendidura vertical (Pena, 2003; Puertas, 2004). El objetivo es conocer exhaustivamente la hidráulica de estos dispositivos lo que nos permitirá establecer criterios de diseño adecuados.

Fue construido un modelo reducido de una escala de hendiduras verticales que consiste en una estructura metálica en forma de canal rectangular de 12 metros de largo con una sección de 1 x 1 m (Figura 4). La solera, las paredes laterales y los tabiques transversales están constituidos por paneles de PMMA (polimetil metacrilato) transparente de 1 cm de espesor. El modelo se encuentra instalado dentro del canal de ensayos en lámina libre. Este canal de ensayos es una estructura de hormigón armado impermeabilizado de planta rectangular de 30x2 m con altura de 1.7 m preparado para albergar, como es el caso, estructuras de gran pendiente. Un circuito cerrado suministra agua al canal por

medio de una instalación clásica de bombeo que permite obtener caudales de hasta 350 l/s. Todo el sistema hidráulico se encuentra automatizado (arranque/parada de bomba, válvulas motorizadas, sistema anti-golpe de ariete) y se gestiona desde un ordenador de control donde también se centraliza los datos procedentes de los caudalímetros electromagnéticos.

Un posicionador cartesiano colocado sobre las piscinas experimentales (piscinas nº 3 y 7) fue utilizado para situar automáticamente la instrumentación en cualquier punto de una malla tridimensional de medida. Fueron utilizados dos instrumentos de medida: un velocímetro ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) y un sensor de calados por conductividad.

Las velocidades fueron cuantificadas mediante un velocímetro ADV (basado en el efecto Doppler de Sontek) que permite la medición de las tres componentes espaciales de la velocidad con muy alta precisión (± 0.1 cm/s) para una frecuencia máxima de 50 Hz. Además de la alta precisión de medida una de las características principales es la escasa distorsión del campo de velocidades en comparación con el instrumental clásico de medida.

Las velocidades fueron evaluadas en planos paralelos a la solera. La superposición de diferentes planos paralelos a la solera conforman una malla de medida tridimensional con puntos espaciados 10x10x10 cm y que abarcan todo el volumen de la piscina. La frecuencia de medición utilizada fueron 15 Hz durante un periodo de $T=15$ seg.

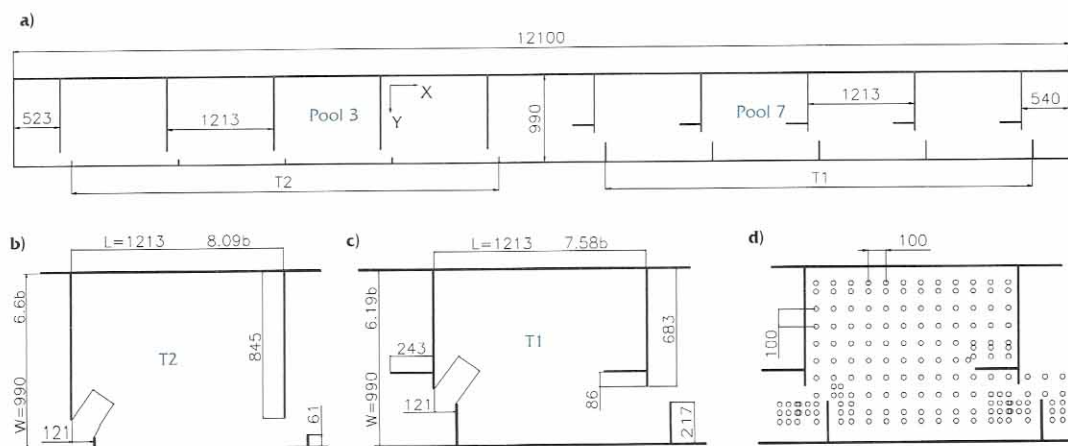


Figura 4. Modelo experimental de la escala de hendiduras verticales construido en laboratorio de hidráulica. a) Planta de la escala con las 9 piscinas: cuatro piscinas según el diseño T2, piscina de transición y cuatro piscinas con diseño T1. b) Configuración del diseño T2. c) Configuración del diseño T1. d) Malla de puntos de medida 10x10 cm.

Tabla 4. Resumen de la campaña experimental

Diseño	Calado				Velocidad			
	T1		T2		T1		T2	
S	5,7%	10%	5,7%	10%	5,7%	10%	5,7%	10%
Rango Q (l/s)	16-85	35-115	25-85	35-125	16-85	35-125	25-85	35-125
Nº Caudales	8	9	7	9	8	9	7	9
Puntos/Nivel	89	111	109	109	101	140	132	132

Tabla 5. Resumen de los resultados experimentales

Diseño	S	Q (m ³ /s)	Q ^A	Y _o (m)	Y _b (m)	Y _m (m)	Y _{max} (m)	Y _{min} (m)	V _b (m/s)
T1	5.7	0.0159	0.4945	0.125	0.158	0.130	0.175	0.107	0.86
T1	5.7	0.0209	0.6529	0.176	0.195	0.179	0.215	0.143	0.85
T1	5.7	0.0246	0.7669	0.190	0.230	0.197	0.236	0.167	0.79
T1	5.7	0.0341	1.0624	0.253	0.306	0.262	0.313	0.212	0.88
T1	5.7	0.0458	1.4277	0.379	0.406	0.386	0.425	0.356	0.84
T1	5.7	0.0540	1.6827	0.437	0.476	0.445	0.483	0.400	0.87
T1	5.7	0.0641	1.9983	0.488	0.529	0.495	0.540	0.453	0.89
T1	5.7	0.0741	2.3104	0.604	0.604	0.608	0.652	0.562	0.88
T1	5.7	0.0859	2.6791	0.665	0.697	0.674	0.711	0.628	0.85
T1	10.05	0.0348	1.0847	0.155	0.201	0.171	0.253	0.093	1.25
T1	10.05	0.0445	1.3879	0.247	0.278	0.262	0.357	0.178	1.20
T1	10.05	0.0551	1.7174	0.314	0.371	0.331	0.420	0.242	1.21
T1	10.05	0.0643	2.0059	0.366	0.406	0.378	0.469	0.288	1.19
T1	10.05	0.0751	2.3425	0.436	0.505	0.452	0.541	0.363	1.25
T1	10.05	0.0849	2.6482	0.489	0.553	0.507	0.597	0.429	1.00
T1	10.05	0.0945	2.9478	0.526	0.561	0.541	0.634	0.443	1.17
T1	10.05	0.1044	3.2554	0.581	0.621	0.596	0.690	0.513	1.05
T1	10.05	0.1150	3.5856	0.641	0.681	0.656	0.755	0.556	1.06
T2	5.7	0.0160	0.5855	0.102	0.107	0.109	0.152	0.061	0.95
T2	5.7	0.0250	0.9153	0.169	0.184	0.180	0.225	0.122	0.93
T2	5.7	0.0350	1.2811	0.263	0.278	0.274	0.323	0.214	0.99
T2	5.7	0.0453	1.6585	0.350	0.376	0.362	0.408	0.298	1.00
T2	5.7	0.0540	1.9772	0.439	0.456	0.449	0.497	0.376	0.97
T2	5.7	0.0639	2.3405	0.524	0.539	0.531	0.577	0.475	1.09
T2	5.7	0.0741	2.7131	0.606	0.618	0.613	0.660	0.552	0.87
T2	5.7	0.0840	3.0785	0.670	0.711	0.679	0.732	0.615	0.96
T2	10.05	0.0253	0.9277	0.134	0.197	0.138	0.208	0.080	1.14
T2	10.05	0.0352	1.2912	0.206	0.242	0.202	0.276	0.132	1.23
T2	10.05	0.0453	1.6601	0.248	0.292	0.251	0.329	0.152	1.32
T2	10.05	0.0549	2.0100	0.307	0.346	0.311	0.405	0.212	1.32
T2	10.05	0.0645	2.3644	0.371	0.399	0.372	0.461	0.275	1.27
T2	10.05	0.0746	2.7325	0.431	0.459	0.432	0.515	0.330	1.31
T2	10.05	0.0838	3.0718	0.483	0.509	0.480	0.569	0.380	1.33
T2	10.05	0.0954	3.4955	0.536	0.575	0.539	0.623	0.437	1.30
T2	10.05	0.1048	3.8398	0.578	0.616	0.578	0.657	0.483	1.30
T2	10.05	0.1151	4.2177	0.615	0.657	0.612	0.714	0.505	1.46
T2	10.05	0.1248	4.5739	0.650	0.712	0.649	0.745	0.536	1.28

S = Pendiente de la escala; Q = caudal experimental; Q^A = caudal adimensional; y_o = calado medio en la sección transversal central; y_b = calado en la hendidura; y_m = calado medio en la piscina; y_{max} = calado máximo en la piscina; y_{min} = calado mínimo en la piscina; V_b = velocidad en la hendidura.

La medición de la altura de la lámina libre de agua en las piscinas se realizó mediante el sistema DHI Wave Meter 102E del Danish Hydraulic Institute. El principio de funcionamiento consiste en medir la conductividad entre dos electrodos paralelos parcialmente inmersos en el agua; la conductividad será proporcional a la altura de la superficie libre del agua sobre dichos electrodos. Este instrumental precisa de un proceso de calibración que fue realizado diariamente de forma que se ajustó el rango de salida para optimizar la precisión de medida (<1 mm). La altura de la lámina de agua fue evaluada en mallas de 10x10 cm, realizando la toma de datos en cada punto durante T=10 seg a una frecuencia de 15 Hz.

Las pendientes habitualmente utilizadas en este tipo de dispositivos se encuentra entre el 5-10% (Tabla 3) por lo que para la configuración experimental se eligieron las pendientes de S=5.7% y S=10% próximas a los límites inferior y superior del rango usual.

Mediante una compuerta móvil situada al final de la escala se establecieron las condiciones hidráulicas necesarias para que en todas las piscinas el valor del calado medio en la sección transversal central fuera el mismo, de forma que se puede considerar que a lo largo de la escala existía, conceptualmente, un flujo uniforme.

En la Tabla 4 podemos observar un resumen de la campaña experimental realizada para ambos diseños (diseño T1 y T2), los caudales utilizados y los puntos de medida en cada plano paralelos a la solera. En el caso de la velocidad, el número de planos paralelos a la solera fue variable según la pendiente y el caudal utilizado.

Resultados Experimentales

A partir de los resultados experimentales conseguidos se pretendió: establecer las relaciones adimensionales entre las variables caudal-calado, describir las configuración de la superficie del agua mediante los calados característicos (máximo, mínimo, medio, en la hendidura) así como conocer los campos de velocidades y los patrones de flujo (Pena, 2003; Puertas, 2004).

En la Tabla 5 se muestra un resumen de los resultados experimentales donde S, es la pendiente de la escala, Q es el caudal experimental, Q^A es el caudal adimensional, y_o es el calado medio en la sección transversal central, y_b es el calado en la hendidura, y_m es el calado medio en la piscina,

y_{max} e y_{min} son los calados máximo y mínimo en la piscina y V_b es la velocidad en la hendidura.

Relaciones Caudal-Calado

Se definió un caudal adimensional (Puertas, 2004),

$$Q^A = Q / \sqrt{g b^5} \quad (1)$$

donde Q es el caudal experimental, g es la aceleración debida a la gravedad y b es la anchura de la hendidura (b=0.16 m para T1 y b=0.15 m para T2). A partir de Q^A se realizó un análisis para establecer las relaciones adimensionales entre calado y caudal según:

$$Q^A = \alpha \left(\frac{y_o}{b} \right)^\lambda \quad (2)$$

donde Q^A es el calado adimensional en la escala, y_o/b es la adimensionalización del calado medio en la sección transversal central utilizando la anchura de hendidura, y α, λ son coeficientes experimentales. Se verificó que en todas las situaciones experimentales estudiadas se mantenía una relación lineal, esto es, en todos los casos λ=1 mientras que el coeficiente α dependía de la configuración de la piscina y de la pendiente.

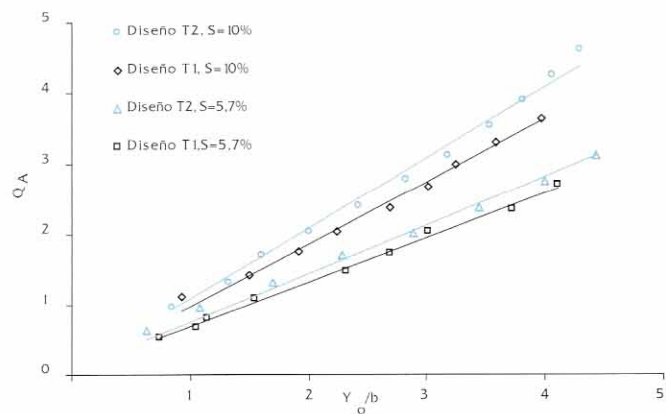


Figura 5. Resultados experimentales de las relaciones adimensionales caudal-calado.

En la Figura 5 podemos observar los resultados experimentales y las relaciones lineales calculadas para ambos diseños y las dos pendientes. En la Tabla 6 se muestran numéricamente tales relaciones. Puede observarse como los valores de α son proporcionales a la pendiente. Un mayor valor de dicho coeficiente implica que para el mismo caudal los calados alcanzados son menores y por lo tanto la capacidad de desagüe es mayor. En este caso los valores son más altos en el diseño T2.

Tabla 6. Ecuaciones adimensionales de las relaciones entre el caudal y los diferentes calados característicos en función del calado medio en la sección transversal central (y_o). Entre paréntesis, el coeficiente de correlación.

Diseño	S	Q^A	y_{min}/b	y_b/b	y_{max}/b	y_m/b
T1	5,7%	$0.631 y_o/b$ (0.9946)	$0.9739 y_o/b - 0.1409$ (0.9986)	$0.9758 y_o/b + 0.2512$ (0.9944)	$0.9993 y_o/b + 0.3018$ (0.9992)	$1.015 y_o/b$ (0.9998)
	10%	$0.8888 y_o/b$ (0.9889)	$0.9742 y_o/b - 0.3822$ (0.9979)	$1.0008 y_o/b + 0.2918$ (0.9933)	$1.021 y_o/b + 0.6133$ (0.9996)	$1.033 y_o/b$ (0.9987)
T2	5,7%	$0.6867 y_o/b$ (0.9903)	$0.9789 y_o/b - 0.2871$ (0.9994)	$1.031 y_o/b + 0.0407$ (0.9983)	$1.0065 y_o/b + 0.3583$ (0.9997)	$1.0183 y_o/b$ (0.9994)
	10%	$0.9988 y_o/b$ (0.9903)	$0.9196 y_o/b - 0.4069$ (0.9965)	$0.9949 y_o/b + 0.2826$ (0.9949)	$1.0323 y_o/b + 0.4811$ (0.9982)	$1.0002 y_o/b$ (0.9997)

En la Tabla 6 también se muestran las relaciones adimensionales entre los diferentes caudales característicos y el calado medio en la sección transversal central. Estas ecuaciones nos proveerán información a la hora de tomar decisiones en el diseño: altura de los tabiques (y_{max}), limitaciones que el calado pueda imponer al paso de los peces (y_{min}), calado existente en secciones críticas como la hendidura (y_b).

Campos de Velocidad y Patrones de Flujo

La configuración de los campos de velocidad es uno de los principales factores para determinar las características del flujo.

En la Figura 6 se muestran los campos de velocidades horizontales (V_x y V_y) en planos paralelos a la solera para dos situaciones experimentales. Un vector de referencia es incluido en las figuras para permitirnos tener un orden de magnitud de las velocidades.

Generalmente se identifican dos regiones: una región de flujo directo donde el agua circula con altas velocidades en una trayectoria curvilínea desde la hendidura hasta la siguiente hendidura aguas abajo de la piscina; y una región de recirculación, caracterizada por bajas velocidades, flujo en sentido inverso (hacia aguas arriba) así como la existencia de remolinos verticales.

En la Figura 7 se esquematizan estas regiones para los tres patrones de flujo encontrados. La esquema del patrón de circulación de la Figura 7Centro se produce en el diseño T1 y pendiente $S=10\%$ para caudales superiores a $Q^A > 2.75$.

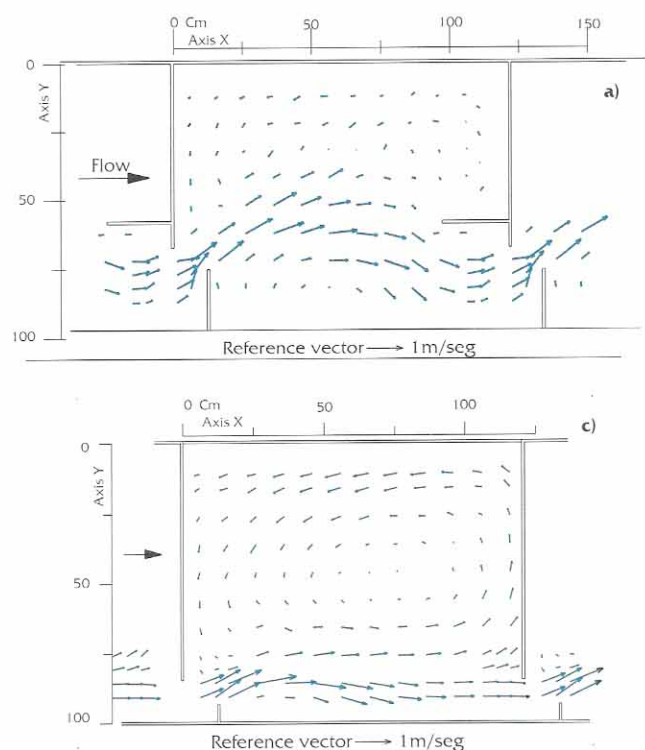


Figura 6. Campos de velocidades horizontales V_x - V_y paralelos a la solera. Izquierda: Diseño T1 y $S=5.7\%$. Derecha: Diseño T2 y $S=5.7\%$.

Estos patrones permitirán a los migradores favorecerse de las diferentes características de estas dos regiones. Por una parte pueden encontrar un camino no tortuoso y claro para el remonte (región de flujo directo) y por otro lado las EHV ofrecen amplias zona de descanso (región de recirculación) donde los peces migradores pueden recuperarse, en caso de precisarlo, del esfuerzo realizado.

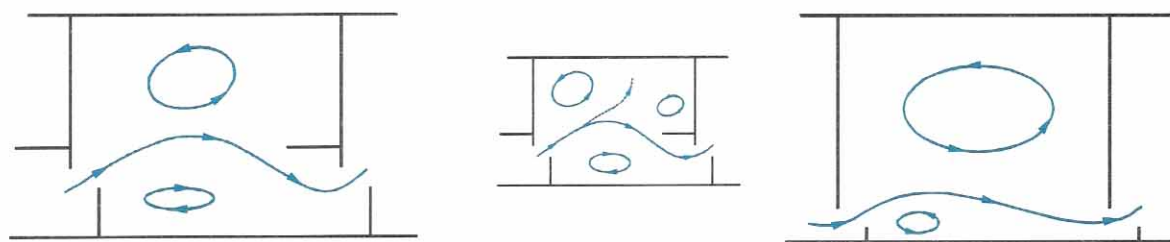


Figura 7. Patrones del flujo en las piscinas: Izquierda: Diseño T1; Centro: Diseño T1, $S_o=10\%$ con $Q^A>2.75$; Derecha: Diseño T2.

En general las características hidráulicas del diseño T1 implican velocidades más pequeñas lo cual contribuye positivamente a su aplicación práctica. El diseño T2 ofrece zonas de recirculación y de flujo directo claramente diferenciadas así como zonas de descanso, con velocidades bajas, más amplias.

Otra característica esencial de las escalas de hendidura vertical es la bidimensionalidad del flujo que se desarrolla en ellas. En la Figura 8 podemos observar las velocidades existentes en un plano vertical paralelo al eje longitudinal de la escala. Las velocidades no varían a lo largo de la vertical y las velocidades verticales son insignificantes frente a las velocidades horizontales excepto en algunos puntos en la zona de la hendidura.

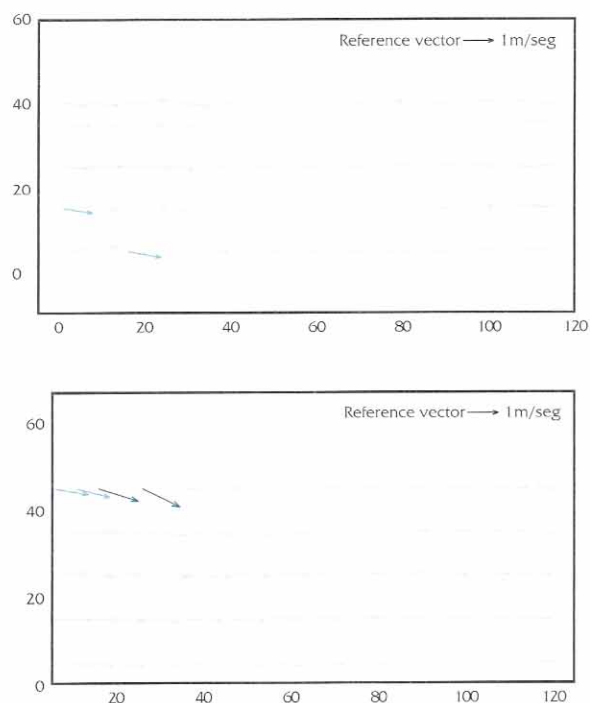


Figura 8. Campos de velocidad, V_x - V_z en planos verticales paralelos al eje longitudinal de la escala. Izquierda: Diseño T1, $S=5.7\%$, $Q=0.065 \text{ m}^3/\text{s}$, $Y=72 \text{ cm}$. Izquierda: Diseño T2, $S=5.7\%$, $Q=0.065 \text{ m}^3/\text{s}$, $Y=86 \text{ cm}$.

Esta característica evitará la desorientación de los peces, el gasto innecesario de energía en la búsqueda de las zonas más favorables y les permitirá elegir la profundidad de natación según las preferencias en cuanto a condiciones de luz, turbidez, etc.

La bidimensionalidad del flujo establece la principal diferencia entre el flujo de las escalas de hendidura vertical y las escalas de depósitos sucesivos.

Velocidades en la Hendidura. Relaciones Velocidad-Caudal

Los caudales de entrada en los dispositivos de remonte sufren oscilaciones derivadas de las propias variaciones naturales de los caudales fluviales. Es necesario, por lo tanto, conocer las relaciones entre el caudal y velocidad. Ejemplos de estas relaciones que fueron establecidas experimentalmente, son mostradas en la Figura 9.

En dicha figura se muestra el valor de la velocidad en varios puntos de la piscina frente al caudal experimental para el diseño T2. Se verificó que la velocidad de un punto depende de su posición relativa dentro de la piscina, del diseño de la piscina y de la pendiente pero se mantiene independiente del caudal que discurre por la escala. La independencia de la velocidad frente al caudal constituye una ventaja de las escalas de hendidura vertical ya que su funcionamiento hidráulico permanecerá constante frente a las variaciones naturales de caudal sin necesidad de elementos de regulación.

La hendidura es una zona singular de paso obligado para los migradores siendo una zona especialmente importante en el funcionamiento de la escala. En la hendidura también se comprobó la independencia de las velocidades frente al caudal como puede verse en la Figura 10, donde se muestran los valores experimentales de las velocidades en la hendidura promediadas en el calado, para ambos diseños y las dos pendientes.

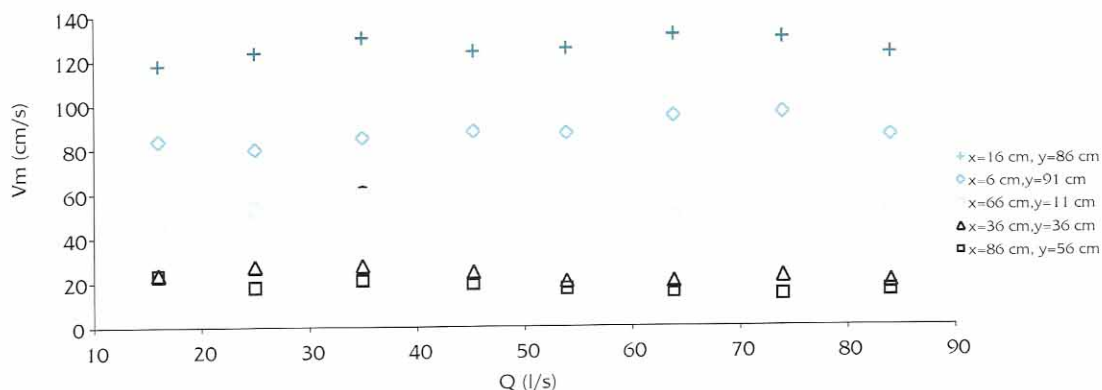


Figura 9. Valores de la velocidad para diferentes puntos frente al caudal circulante en el diseño T2 y S=5,7%.

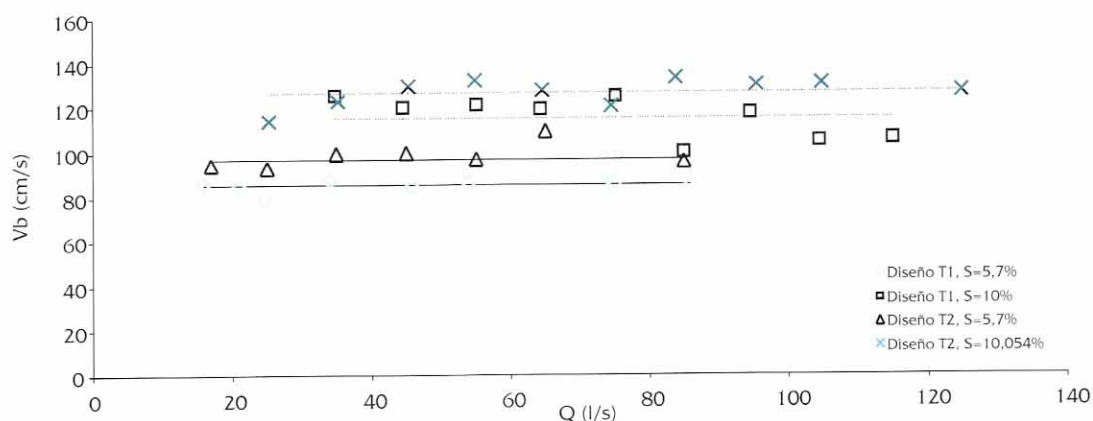


Figura 10. Valores experimentales de la velocidad en la hendidura (Vb) para los dos diseños y ambas pendientes.

Para establecer un orden de magnitud de diseño estas velocidades promedio en la hendidura se trasladan mediante la semejanza de Froude a dimensiones de prototipo correspondiente a una hendidura estándar de 30 cm. En la Tabla 7 podemos ver estas velocidades para ambos diseños y en las dos pendientes estudiadas.

Tabla 7. Valores del vector velocidad en la hendidura para un prototipo real de 30 cm de anchura estándar de hendidura.

	Diseño T1	Diseño T1	Diseño T2	Diseño T2
	5,7%	10%	5,7%	10%
V_b (m/s)	1,5	1,8	1,38	1,83

Evaluación de la Idoneidad Biológica

Una vez realizada una caracterización hidrodinámica pormenorizada de las escalas de hendidura vertical, se estableció una metodología para evaluar la idoneidad de los diseños estudiados en cuanto a las variables de velocidad y calado. El fundamento en las velocidades es comparar las velocidades existentes en la escala con las veloci-

dades desarrolladas por los migradores en función de variables como temperatura del agua, tamaño del pez, velocidades de natación etc. y así conseguir un diseño con las dimensiones óptimas a la situación concreta de estudio.

A partir de las velocidades de la corriente que se midieron experimentalmente en las EHVs y de las velocidades de natación de los peces migradores (salmónidos) extraídas de la literatura especializada se calcularon las máximas distancias recorribles por los individuos. Las velocidades máximas de natación (V_n) y los tiempos de permanencia (t_p) a dicha velocidad dependerán de la especie piscícola, la talla del individuo y la temperatura del agua (Larinier, 1998). Para los salmónidos (truchas y salmones) se calcularon las longitudes máximas que podrían recorrer según la velocidad de la corriente (V_c):

$$D_{\max} = (V_n - V_c) * t_p \quad (3)$$

En la Figura 11 se muestran las distancias máximas para tallas de individuos de 0.25 y 0.35 m y para temperaturas de 10,15 y 20°C.

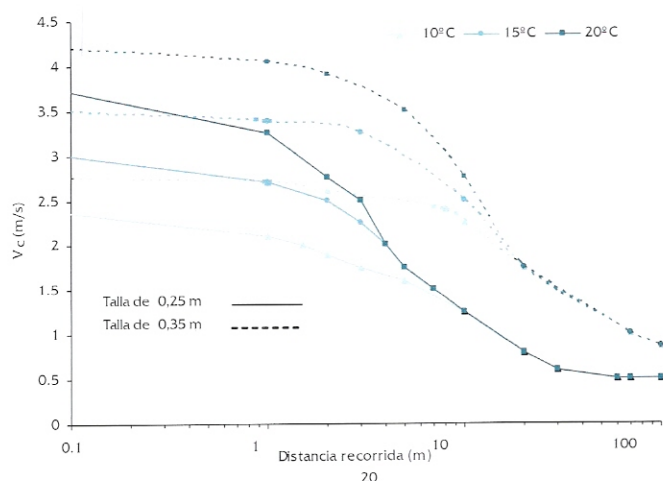


Figura 11. Longitud máxima que los migradores son capaces de nadar antes de la extenuación frente a la velocidad de la corriente.

Estas distancias máximas potencialmente nadables (D_{max}) fueron comparadas con las distancias que los individuos necesitarían realmente nadar (D) en las diferentes secciones transversales al flujo en que fueron divididas las piscinas (Teijeiro, 2001) (Figura 12).

En la mayoría de los casos (Tabla 8) la D_{max} es de un orden de magnitud mucho mayor que la D . En la tabla se muestran, para prototipos de escalas con diferentes tamaños de hendidura, las velocidades máximas del agua, la distancia máxima que el migrador es capaz de recorrer (D_{max}) y

la distancia que necesita recorrer (D).

Una lectura de la tabla nos permite observar que, por ejemplo, para el diseño T1 y pendiente 5,7% se podrían construir escalas con anchura de hendidura de hasta 90 cm. A partir de esta anchura las velocidades existentes no permitiría ascender a los individuos de 0.25 m al ser la distancia máxima que pueden recorrer los individuos inferior la distancia que realmente deberían recorrer en la escala ($D_{max} = 0.36$ menor que $D=0.51$).

No solo se realizó un análisis de las velocidades sino también de los caudales mínimos que permitieran la existencia de calado suficiente para permitir el paso sin dificultades de los peces migradores.

En la Tabla 9 se muestran en función de la anchura de la hendidura los caudales mínimos necesarios para ambos diseños y las dos pendiente para el paso de trucha (calados superiores a 0.40 m) y de salmón (calados superiores a 0.50 m).

CONCLUSIONES

Se lograron los objetivos preestablecidos al inicio de la investigación mediante la consecución de una metodología experimental fiable, el estudio hidráulico pormenorizado de las escalas de hendidura vertical y la implementación de una evaluación de la idoneidad de los dispositivos.

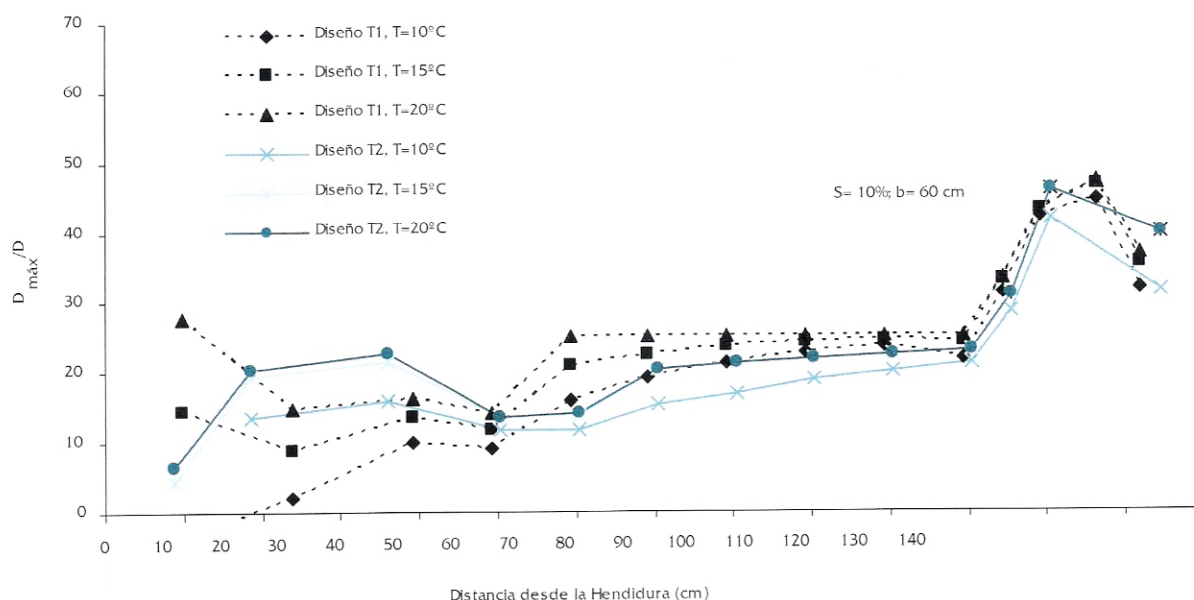


Figura 12. Relación D_{max}/D en las piscinas a lo largo del recorrido entre las dos hendiduras en función del diseño de las piscinas y la temperatura del agua.

Tabla 8. Velocidades máximas, distancias máximas que los peces son capaces de nadar y distancias que los peces realmente deberían nadar en la escala en función de la anchura del prototipo construido.

b (cm)	v(cm/s)	Diseño T1, S=5,7%		v(cm/s)	Diseño T1, S=10%		D(m)
		D _{max} (m) Talla 0,25 m	D _{max} (m) Talla 0,35 m		D _{max} (m) Talla 0,25 m	D _{max} (m) Talla 0,35 m	
30	119	> 10 m	> 10 m	162	6.79	> 10 m	0.15
40	137	9.69	> 10 m	184	4.21	> 10 m	0.21
50	153	7.80	> 10 m	207	1.52	> 10 m	0.26
60	168	6.08	> 10 m	230	0	> 10 m	0.31
70	181	4.51	> 10 m	249		5.88	0.36
80	194	3.04	> 10 m	266		1.12	0.41
90	206	1.67	> 10 m	282		0	0.46
100	217	0.36	> 10 m	295			0.51
110	227	0	> 10 m	309			0.56
120	238		8.96	323			0.62
130	247		6.44	337			0.67
140	257		3.64	349			0.72
150	266		1.12	361			0.77
160	274		0	373			0.80

b (cm)	v(cm/s)	Diseño T2, S=5,7%		v(cm/s)	Diseño T2, S=10%		D (m)
		D _{max} (m) Talla 0,25 m	D _{max} (m) Talla 0,35 m		D _{max} (m) Talla 0,25 m	D _{max} (m) Talla 0,35 m	
30	140	9.39	> 10 m	183	4.33	> 10 m	0.23
40	161	6.86	> 10 m	211	1.05	> 10 m	0.31
50	180	4.64	> 10 m	236	0	9.52	0.38
60	198	2.62	> 10 m	259		3.08	0.46
70	213	0.77	> 10 m	280		0	0.54
80	228	0	> 10 m	299			0.61
90	242		7.84	318			0.69
100	255		4.17	335			0.77
110	268		0.69	351			0.84

Tabla 9. Caudales mínimos (m³/s) que implican calados suficientes para la trucha común (calado>0.4 m) y el salmón atlántico (calado>0.5 m)

b (m)	Caudales mínimos para Truchas (m ³ /s)				Caudales mínimos para Salmón (m ³ /s)			
	Diseño T1		Diseño T2		Diseño T1		Diseño T2	
	5.7%	10%	5.7%	10%	5.7%	10%	5.7%	10%
0.3	0.167	0.270	0.203	0.293	0.204	0.322	0.243	0.351
0.4	0.267	0.448	0.335	0.483	0.324	0.528	0.397	0.571
0.5	0.387	0.672	0.499	0.719	0.466	0.783	0.585	0.843
0.6	0.528	0.943	0.697	1.003	0.632	1.089	0.810	1.166

Se han establecido las relaciones adimensionales caudal-calado. Estas relaciones se han demostrado que son lineales y que dependen del diseño del modelo de piscina y de la pendiente geométrica de la escala. El diseño T2 por su simplicidad constructiva posee una mayor capacidad de desagüe que el diseño T1.

Se ha estudiado la configuración de los campos de velocidades y los patrones de flujo. En general, se identifican dos regiones: una región de

flujo directo donde el agua circula con altas velocidades en una trayectoria curvilínea desde la hendidura hasta la siguiente hendidura aguas abajo de la piscina; y una región de recirculación, caracterizada por bajas velocidades, flujo en sentido inverso así como la existencia de remolinos verticales.

Se ha constatado la bidimensionalidad del flujo. Las velocidades no varían a lo largo de la vertical y las velocidades verticales son insignificantes frente a las velocidades horizontales

excepto en algunos puntos en la zona de la hendidura. Esta característica evitará la desorientación de los peces, el gasto innecesario de energía en la búsqueda de las zonas más favorables y les permitirá elegir la profundidad de natación según las preferencias en cuanto a condiciones de luz, turbidez, etc.

Se han estudiado las relaciones entre los caudales experimentales y las velocidades en la piscina y se han cuantificado las velocidades en una sección especialmente crítica como la hendidura. Se ha verificado que la velocidad de un punto depende de su posición relativa dentro de la piscina, del diseño de la piscina y de la pendiente pero se mantiene independiente del caudal que discurre por la escala. La independencia de la velocidad frente al caudal constituye una ventaja de las escalas de hendidura vertical ya que su funcionamiento hidráulico permanecerá constante frente a las variaciones naturales de caudal. En la hendidura también se ha comprobado la independencia de las velocidades frente al caudal.

Finalmente se ha establecido una metodología para realizar una evaluación de la idoneidad de las EHV en función de parámetros hidráulicos (velocidades y calados) y parámetros biológicos (velocidades de natación, talla del individuo). El fundamento es comparar las velocidades y los calados existentes en la escala con las capacidades y preferencias de los migradores en función de variables como temperatura del agua, tamaño del pez, velocidades de natación etc. y así conseguir un diseño con las dimensiones óptimas a la situación concreta de estudio.

A partir de la caracterización hidrodinámica de los dos modelos (T1 y T2) de escalas de hendidura vertical y de la evaluación biológica de la idoneidad de dichos modelos, se han extraído importantes criterios de diseño aplicables a la construcción de dispositivos de remonte eficientes que contribuyen a conservar la biodiversidad de los ecosistemas fluviales

El diseño efectivo de dispositivos de franqueo de obstáculos para peces es una tecnología multidisciplinar. La puesta en común de los conocimientos de biólogos e ingenieros, junto con la imprescindible colaboración de las administraciones responsables permitirá minimizar los problemas causados por las obras hidráulicas transversales sobre las especies migradoras piscícolas.

El esfuerzo realizado en la investigación de estos dispositivos debe ser aprovechado con el fin de mantener la salud de los ecosistemas acuáticos de forma que podamos conservar para las próximas generaciones la riqueza natural de los ríos.

LISTA DE SÍMBOLOS

b	anchura de la hendidura
D	distancia que el pez efectivamente necesita recorrer
D_{max}	distancias máximas potencialmente nadables
g	aceleración debida a la gravedad
Q	caudal experimental
Q^A	caudal adimensional
S	pendiente de la escala
t_p	tiempo de permanencia a velocidad máxima
V_b	velocidad en la hendidura
V_c	velocidad de la corriente de agua
V_m	velocidad media en un punto
V_n	velocidades máximas de natación
y_b	calado en la hendidura
y_m	calado medio en la piscina
y_{max}	calado máximo en la piscina
y_{min}	calado mínimo en la piscina
y_o	calado medio en la sección transversal central

REFERENCIAS

- Bell, M.C., (1984). Fisheries handbook of engineering requirements and biological criteria, U.S. Army Corps of Engineers, North Pac. Div., Portland, OR. 290 pp.
- Clay, C. H., (1995). Design of fishways and other fish facilities. Lewis Publishers, CRC Press. Boca Raton, Florida.
- Cowx, I.G., Welcomme, R.L., (1998). Rehabilitation of rivers for fish. FAO, Fishing News Books, Oxford.
- Elvira, B., Nicola, G., Almodóvar, A. (1998). Sistemas de paso para peces en presas. CEDEX. Ministerio de Fomento. 113 p.
- Katopodis, C. (1992). Introduction to fishway design. Working document, Freshwater Institute, Department Fisheries and Ocean, Winnipeg, Manitoba, Canada, 1992.
- Larinier, M., Porcher, J.P., Travade, F., Gosset, C., (1998). Passes à poissons. Expertise conception des ouvrages de franchissement. collection Mise au Point, Conseil Superior de la Pêche, Paris. 336 p.
- Nicola, G. G., Elvira, B., Almodóvar, A. (1996). Dams and fish passage facilities in the large river of Sapin: effects on migratoria species. Archiv für hydrobiologie, 113(10): 375-379.
- Odeh, M., (ed.) (1999). Innovations in fish passage technology. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland.

- Odeh, M., (ed.) (2000). Advances in fish passage technology: engineering design and biological evaluation. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland.
- Office of Technology Assessment, OTA, (1995). Fish passage technologies: protection at hydroelectric facilities, Report OTA-ENV-641, Washington DC.
- Pena, L., Teijeiro, T., Puertas, J. (2003) "Experimental study of depth-discharge equations and velocity patterns on vertical slot fishways". Proceedings of the IAHR congress. August 24-29. Thessaloniki, Greece. p. 433-439.
- Pena, L., Puertas, J., Fraga, S., Teijeiro, T. (2004). "Escalas de peces: Una solución al efecto barrera de las obras hidráulicas transversales. La situación gallega". II Congreso Internacional de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. Santiago de Compostela, 22-24 September. 871-882. 2003-2004.
- Puertas, J., Pena, L., Teijeiro, T. (2004) "An experimental approach to the hydraulics of vertical slot fishways", Journal of Hydraulic Engineering (ASCE). Vol. 130. No. 1. p. 10-23
- Rajaratnam, N., Van der Vinne, G., Katopodis, C. (1986). "Hydraulics of vertical slot fishways". Journal of Hydraulic Engineering (ASCE). Vol 112. No 10. p. 909-927.
- Teijeiro, T. (2001). Criterios de diseño de escalas de peces de hendidura vertical. Tesis Doctoral, Dpto. Enxeñaría Agroforestal. Universidade de Santiago de Compostela. Lugo.
- Wu, S., Rajaratnam, N., Katopodis, C. (1999). "Structure of flow in vertical slot fishways". Journal of Hydraulic Engineering (ASCE). Vol 125. No 4. p. 351-360.