8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La Ciencia forestal y su contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible

8CFE - 261

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022
ISBN 978-84-941695-6-4
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza

Rampa de flujo ascendente en el azud de "El Pardo" (Madrid): una solución innovadora para la mejorar la continuidad de los ríos

FERNÁNDEZ YUSTE, J.A.[1]; CARRERO DÍEZ, L.[1] y MARTÍNEZ SANTA-MARÍA, C.[1]

[1] Grupo de Investigación Ecología y Gestión Forestal Sostenible. ECOGESFOR-UPM. E.T. S. Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid. C. de José Antonio Novais, 10, 28040 Madrid.

Resumen

La fragmentación de los ríos, consecuencia de las barreras que suponen azudes y pequeñas presas, es uno de los grandes retos a los debemos hacer frente para recuperar la integridad ambiental de nuestros ecosistemas fluviales. Las rampas naturalizadas son soluciones técnicas que en los últimos años estan ocupando un puesto destacado frente a otros pasos para peces más convencionales.

Esta comunicación presenta: (i) el diseño de una rampa para peces en el río Manzanares (Madrid) siguiendo la metodología propuesta para "rampas de flujo ascendente", nuevo tipo de rampa naturalizada, caracterizada por la generación de flujos ascendentes que la hacen transitable para prácticamente cualquier especie y (ii) los resultados de su seguimiento y monitoreo para la validación de los principales parámetros hidráulicos. Estos resultados confirman el predominio de velocidades negativas (sentido contrario al flujo) o nulas en las zonas denominadas de reposo y velocidades en las zonas rápidas, siempre inferiores a la capacidad máxima de natación de la especie objetivo (2m/s).Tambien se comprueban que tanto los calados como las potencias a disipar permanecen dentro de los niveles admisibles (> 0.2m y <190w/m^3 respectivamente).

La rampa de El Pardo constituye a fecha de hoy, el primer ejemplo de rampas de flujo ascendente construido, y esta sirviendo de referencia para la ejecución de pasos similares en otros puntos de nuestra red hidrográfica.

Palabras clave

Restauración fluvial, conectividad de la ictiofauna, río Manzanares, dispositivos de paso.

1. Introducción

Muchas de las especies de ictiofauna de los ríos realizan migraciones en algún momento de su ciclo biológico. El objetivo de estas migraciones es el acceso a determinados hábitats en busca de unas condiciones ambientales adecuadas (temperatura del agua, oxígeno disuelto, …) y de un biotopo hidráulico idóneo (calado, velocidad y sustrato) que les asegure, -o les haga favorable-, la reproducción, la disponibilidad de alimento, el refugio, etc. (McIntyre et al., 2015).

Las infraestructuras transversales que salpican las redes fluviales (presas, azudes, vados, enlosados, obras de drenaje transversal, …), si no llevan asociadas un dispositivo de paso correctamente diseñado, pueden constituir verdaderas barreras infranqueables, o suponer retrasos importantes en estos movimientos a lo largo del eje fluvial. Consecuencia de ello es la alteración en la distribución y abundancia de especies y poblaciones en los ríos (Cooper et al., 2017; Fuller, Doyle and Strayer, 2015).

Para solventar esta afección a la conectividad longitudinal de nuestros ríos se diseñan dispositivos de paso con tipologías y fundamentos muy diversos (U.S. Fish and Wildlife Service, 2017) (Sanz-Ronda et al., 2013) (Franklin et al., 2018).

Como primera aproximación pueden distinguirse dos grupos principales de dispositivos de paso: asistido y no asistido, según se ayude o no al pez en el tránsito por el obstáculo.

Dentro del primer grupo se incluyen los ascensores, las esclusas y la captura y transporte. Al segundo grupo pertenecen las escalas (de ralentizadores y de artesas con sus múltiples variantes), los cauces artificiales naturalizados (rampas y by-pass principalmente) y otros dispositivos de uso más limitado como prebarreras o rampas anguleras, entre otros.

Las rampas de rocas o más comúnmente rampas, constituyen por su carácter naturalizado, su versatilidad, y su alto grado de franqueabilidad por la ictiofauna, uno de los dispositivos de paso más recomendables para obstáculos de altura reducida (Zheng et al., 2020). Consisten básicamente en un cauce con sustrato naturalizado y pendientes suaves, diseñado para mantener condiciones de profundidad y velocidad biológicamente adecuadas durante los caudales representativos del período de migración de la especie objetivo. Otros elementos de diseño aseguran la circulación de caudales mayores sin comprometer la estabilidad estructural de la misma.

Las condiciones de flujo en la rampa están condicionadas, además de por la pendiente, por la disposición y tamaño de los bolos que la conforman. Respecto a las disposiciones utilizadas, las más frecuentes son la ubicación de los bolos alineados longitudinalmente en hiladas transversales al flujo principal (Zheng et al., 2020) o la disposición de bolos dispersos, manteniendo unos patrones para las distancias relativas (FAO/DVWK, 2002).

En la mayoría de las rampas, el flujo se produce a través de los vertederos o de las escotaduras existentes entre cada dos bolos consecutivos. Las condiciones críticas de paso para la ictiofauna vendrán dadas por variables hidráulicas (Xu, 2017) como la velocidad en la ventana de vertido, el calado mínimo en el paso, el salto en el caso de no haber paso sumergido y la potencia generada en el salto de agua y su disipación hasta umbrales aceptables.

Recientemente se ha presentado en Fernández y Martínez (2021) un nuevo tipo de rampas denominadas “rampas de flujo ascendente “que presentan muchas de las características comunes al conjunto de rampas anteriormente citadas, pero que introducen como rasgo distintivo una disposición singular de los bolos en la hilada.

Esta nueva disposición genera un comportamiento hidráulico muy particular ya que se inducen flujos ascendentes de sentido contrario al flujo principal en la rampa. La trascendencia biológica de estos nuevos flujos es incuestionable, pues ayudan al pez en su remonte, hasta tal punto que en muchas ocasiones el pez podría atravesar la rampa empujado por estos flujos y sólo puntalmente debería nadar para superar el paso de la ventana entre dos bolos. El diseño presentado, y el protocolo de dimensionado propuesto, además de garantizar la generación de estos flujos ascendentes, asegura también velocidades adecuadas en los pasos, calados mínimos en los estanques y potencias a disipar, siempre dentro de niveles compatibles con las capacidades natatorias de nuestras especies. Además, contempla aspectos que permiten al proyectista dimensionar la rampa para un rango notable de caudales, garantizando para todo el rango su transitabilidad. Los autores facilitan también un software para el diseño de este tipo de rampas disponible en https://rampas.chduero.es/.

Esta comunicación presenta la aplicación de dicho tipo de rampa como medida para mitigar el impacto barrera generado en el azud conocido como azud de El Pardo, en el río Manzanares (Madrid). La rampa de El Pardo forma parte del conjunto de medidas contempladas en el proyecto de restauración fluvial del río Manzanares en el entorno del Real Sitio de El Pardo (http://restauracionfluvialriomanzanares.es/).

Dicho proyecto se redactó en 2016 gracias al impulso de la Dirección General del Agua del Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA) y de la Confederación Hidrográfica del Tajo, en el marco del Plan PIMA Adapta (Plan de Impulso al Medio Ambiente para la Adaptación al Cambio Climático en España).

El tramo de actuación comprendía desde aguas abajo de la presa de El Pardo hasta su entrada en Madrid (cruce con la M-40) con una longitud total de 8.4 km más los 7 km del tramo bajo del arroyo de la Trofa, principal tributario por la margen derecha.

El proyecto incluía actuaciones de índole muy diversa (mejora del hábitat fluvial, de la calidad del agua, del ecosistema ribereño, de variables hidromorfológicas, de uso social, etc.) (Aguilera *et al*., 2019). Una de las medidas más emblemáticas era la construcción de la citada rampa en un azud existente conocido como azud del "Campo de Golf" o azud de "El Pardo", diseñado para abastecer de agua a una balsa contraincendios ubicada en el Monte de El Pardo (ETRS 89 UTM H30 N (X: 433.856,86 Y:4.486.220,33). La Figura 1 representa el azud y sus infraestructuras asociadas en su situación original. La rampa fue diseñada por los autores de esta comunicación y construida a principios de 2019 por la empresa TRAGSA.

Figura 1. Estado inicial del azud de El Pardo (derecha) y ubicación relativa de la balsa contra incendios y la caseta de bombeo (izquierda).

El proyecto de restauración fluvial del río Manzanares en el entorno del Real Sitio de El Pardo, contemplaba para este azud una actuación con una doble finalidad: i) permeabilizar el obstáculo para la ictiofauna y ii) reducir el remanso generado aguas arriba -cuya longitud se evaluó en unos 1.1 km-. Ambos objetivos deberían ser compatibles con el mantenimiento de la funcionalidad de la toma.
La solución propuesta que satisfacía las exigencias del proyecto de Restauración fue construir un dispositivo de paso tipo rampa flujo ascendente para reducir el efecto barrera y rebajar la cota del umbral del azud para aminorar el efecto remanso (como resultado de los estudios hidromorfológicos se estimó un rebaje de 0.5 m en la cota del umbral del azud, en una longitud de 7.2 m). Como el

rebaje del azud supuso una modificación en la cota de la toma de la derivación, para seguir asegurando su funcionalidad, se hizo necesario una modernización de las infraestructuras de derivación y bombeo (canal lateral, compuerta, válvula de pie en la aspiración, mangote, ...). Al ser las derivaciones muy puntuales y escasas (sólo en la campaña de incendios, y en ocasiones sólo para el llenado inicial de la balsa), el caudal derivado no se tendrá en consideración en la estimación del caudal disponible en el río.

Los condicionantes existentes fueron determinantes en la solución final adoptada:

- Localización del rebaje: el rebaje del azud debe realizarse próximo a la rampa, para favorecer el efecto llamada de la ictiofauna en situaciones de desagüe por el vertedero generado.
- El barbo fue seleccionado como la especie objetivo de la rampa.
- Periodo funcional: la rampa se diseñó para ser funcional en el periodo pre-reproductivo de los ciprínidos (abril -junio).
- El tramo está sometido a un régimen de caudales ecológico mínimo según el vigente Plan de Cuenca (Tabla 1).

Tabla 1. Caudales ecológicos mínimos trimestrales en m³/s para el horizonte 2015 en la masa estratégica Rio Manzanares desde Embalse de El Pardo hasta Arroyo de la Trofa (BOE nº 89 de 2014).

Caudales ambientales en m³/s			
Oct-Dic	*Ene-Mar*	*Abr-Jun*	*Jul-Sep*
0.82	*0.93*	*0.97*	*0.49*

- El rango de caudales disponibles es muy limitado, al tratarse de un tramo fuertemente regulado, ubicado aguas abajo de las presas de Santillana y de El Pardo e inmediatamente aguas arriba de la población de Madrid, lo que motiva una fuerte laminación de los caudales máximos.
- Ubicación de la rampa: los condicionantes de acceso de maquinaria durante la obra determinaron la ubicación de la rampa en la margen derecha, contigua al nuevo canal de derivación para la toma de bombeo.
- También se consideró conveniente el retranqueo de la rampa respecto al azud dadas las peculiaridades morfológicas del tramo aguas abajo de la obra. Esta circunstancia refuerza el efecto llamada, al ubicarse la entrada a la rampa próxima al vertido del aliviadero del azud.
- La presencia de una losa aguas abajo del azud, hizo necesario disponer de una alineación de bolos exterior a la misma (denominada hilada de control), que redirigiese el flujo vertido por el aliviadero del azud y reforzarse el efecto llamada.
- El intenso uso social del tramo confiere a la actuación a diseñar una nueva dimensión educativa y de concienciación de la población, que deberá ser tenida en cuenta para incluir un conjunto de actuaciones complementarias (mirador, paneles informativos, etc.).

A mediados de 2021 Icthios gestión ambiental inició un programa de seguimiento de la ictiofauna consistente en la colocación de dos antenas (aguas arriba y abajo de la rampa) y el marcaje de individuos con PIT-TAG. A fecha de hoy no se dispone todavía de resultados definitivos, pero los

registros obtenidos hasta el momento permiten validar muy positivamente el tránsito de la ictiofauna por el dispositivo.

2. Metodología

Esta rampa ha sido diseñada siguiendo la metodología recogida en Fernández y Martínez (2021), y haciendo uso del software asociado. Dado que el objetivo principal de esta comunicación no es la presentación de dicha metodología sino la aplicación de la misma en la construcción de la rampa de El Pardo, se presentará a continuación un breve resumen de los fundamentos metodológicos.,

En este tipo de rampas los bolos se disponen formando hiladas, cuyo eje principal es transversal al flujo, aunque en cada hilada la disposición de los bolos es contrapeada o en zig-zag, manteniendo un ángulo de desplazamiento (α) entre cada dos bolos consecutivos (Figura 2).

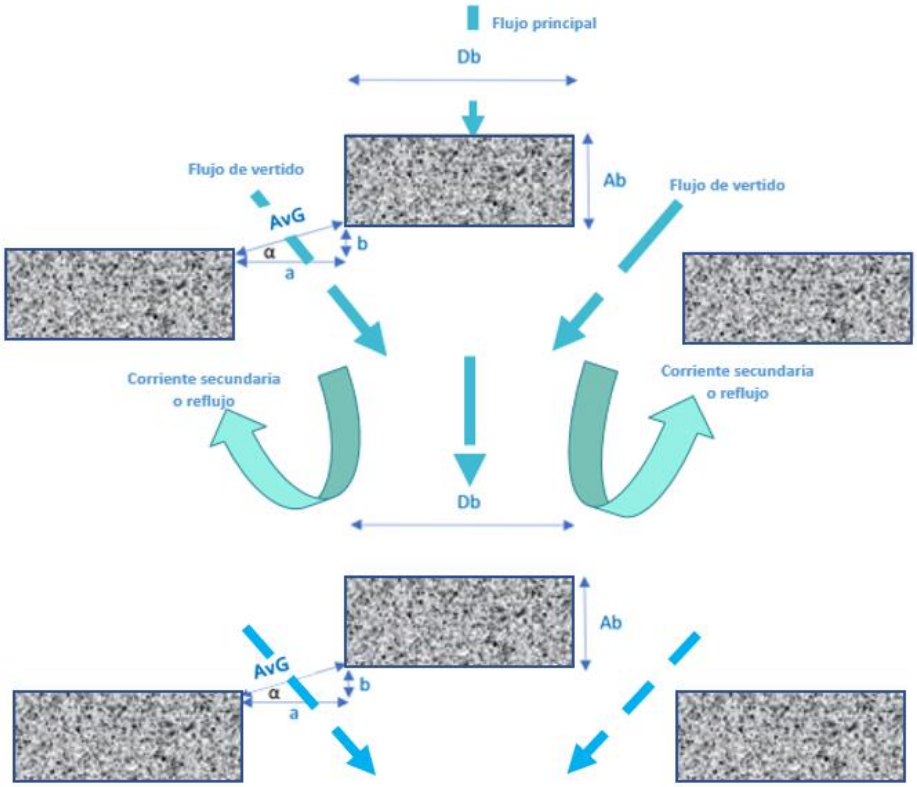

Figura 2. Esquema simplificado del comportamiento del flujo a través de dos ventanas contiguas y entre dos hiladas consecutivas.

El ángulo α es una variable independiente, pero con un condicionado estricto, ya que debe verificarse que 30°≤α°≤45°.

La separación entre bolos es la denominada "anchura de ventana geométrica" (AvG), con una proyección en la dirección del flujo (b) y otra en la dirección transversal (a).

Sabiendo que el vertido se produce siempre perpendicular a la ventana de flujo, la disposición en zig-zag de los bolos en la hilada, origina que los flujos de vertido de dos ventanas contiguas "choquen" uno contra otro, frenándose mutuamente y disipando de manera natural la potencia del salto.

Este flujo ralentizado iniciaría su aceleración aguas abajo en la rampa, pero la cara plana del bolo de la hilada siguiente lo detiene de nuevo. Como consecuencia de todo este proceso, se generan corrientes secundarias ascendentes o "reflujo" (en sentido contrario al del flujo principal) que pueden visualizarse fácilmente en campo y donde se han constatado velocidades muy bajas, nulas e incluso negativas en muchas ocasiones. Esta circunstancia es la que permite denominar a este tipo de rampas como "rampas de flujo ascendente".

La generación de estos flujos ascendentes está garantizada siempre que, en la hilada, los bolos se dispongan con el ángulo adecuado (α). De este modo, el flujo se compartimenta en la rampa, alternándose las zonas de flujo descendente con velocidades más altas, y las de flujo ascendente con velocidades bajas o reflujo. Esta compartimentación nos permite definir un elemento fundamental del diseño en este tipo de rampas: el "módulo". Un módulo es la unidad mínima necesaria para generar flujos ascendentes y está constituido por tres bolos consecutivos pertenecientes a una hilada y dispuestos adecuadamente.

El Manual de diseño establece una secuencia metodológica en cinco fases: dimensionado hidráulico, dimensionado geométrico, dimensionado para el control de la potencia a disipar, obtención del rango funcional de caudales y evaluación del comportamiento en régimen no uniforme (Figura 3).

Figura 3. Secuencia metodológica para el dimensionado de rampas de flujo ascendente.

Para la estimación del caudal de diseño (QRMIN), y siguiendo las recomendaciones recogidas en Fernández y Martínez (2021), se llevó a cabo un estudio de los caudales circulantes en el tramo durante el período de funcionalidad de la rampa. Como ya se ha comentado el tramo se ubica en una masa de agua estratégica donde esta implementado el régimen de caudales ecológicos. La información facilitada por la Confederación Hidrográfica del Tajo permitió conocer los caudales reales circulantes en el periodo actual. Para el periodo de funcionalidad de la rampa, los caudales ambientales vertidos por la presa de El Pardo son muy superiores a los mínimos mostrados en la Tabla 1, estimándose como caudal de diseño 1.15 m^3/s.

3. Diseño de la rampa

Los principales datos de partida para el diseño de la rampa son los siguientes: velocidad máxima: 2.2 m/s; calado mínimo: 0.2m; ancho de paso mínimo: 0.2m; potencia disipada máxima:200W/m³; longitud del azud (Laz): 7.2m (zona del rebaje); espesor en coronación(e): 1m; cota de entrega de la rampa (Ce): 599 msnm; cota del umbral del azud (Cuaz): 600.15 msnm; diferencia de cota entre la del punto más alto de los bolos de la hilada superior y Cuaz (haz): 0.25m.

Se presenta a continuación, un resumen del conjunto de variables obtenidas (Tabla) y una imagen de la rampa (Figura 4):

Tabla 2. Resumen de variables de diseño

VARIABLES	SIGNIFICADO	VALOR
Nº módulos	Número de módulos	3
h_2 (m)	Calado aguas abajo del bolo	0.2
Δh (m)	Desnivel en la lámina de agua entre dos estanques sucesivos	0.15
h_{az} (m)	Diferencia de cota entre la del punto más alto de los bolos de la hilada superior y la cota del umbral del azud	0.25
Vmax (m/s)	Velocidad máxima en la ventana de flujo	1.7
AvG (m)	Anchura de la ventana geométrica	0.5
h_1 (m)	Calado aguas arriba del bolo	0.35
y (m)	Diferencia de cota entre umbral del azud y lámina de agua aguas arriba del bolo de la hilada superior para Q_{RMIN}	0.05
H_T (m)	Altura total a salvar	1.15
H_R(m)	Altura de la rampa. Corresponde a la diferencia de cota en el lecho de la rampa entre el punto de entrega y el de toma.	0.75
Nhil	Número de hiladas	6
Nest	Número de estanques	5
Hb (m)	Altura del bolo (altura vista)	0.8
Db (m)	Diámetro del bolo o dimensión del bolo en la dirección transversal al flujo en la rampa	0.8
Ab (m)	Anchura del bolo o dimensión del bolo en la dirección del flujo en la rampa	0.60
α (˚)	Ángulo que define la alineación entre dos bolos consecutivos	30
tgβ	Pendiente de la rasante de la rampa con la horizontal	0.04
Amb (m)	Anchura del módulo de borde	2.8
Amc (m)	Anchura del módulo de centro	2.4
Arampa (m)	Anchura de la rampa	8.2
Le (m)	Longitud del estanque	3.7
L_R (m)	Longitud de la rampa	19
Pd_{mb} (w/m³)	Potencia disipada en módulo de borde	191
Pd_{mc} (w/m³)	Potencia disipada en módulo de centro	222
Q_{RMIN} (m³/s)	Caudal mínimo para el que la rampa debe ser funcional. Es el caudal considerado para las tres primeras fases de dimensionado	1.15
Q_R (y=0)(m³/s)	Caudal circulante por encima del cual el azud empieza a verter	1.35
Q_{RMAX} (m³/s)	Caudal máximo circulante por la rampa por encima del cual los bolos se anegan	3.1
Q_{AZ} (h_{az}) (m³/s)	Caudal que desagua el azud cuando circula Q_{RMAX} por la rampa	2.4
Qd_{MAX}(m³/s)	Caudal disponible en el río cuando circula por la rampa Q_{RMAX}	5.5

Figura 4. Vista de la rampa. En primer término, aparece el canal de toma.

Las características propias de esta rampa hicieron necesario considerar otras actuaciones complementarias que se resumen a continuación:

a) Estanque de encuentro:

Para el diseño del estanque de encuentro (Figura 5) se siguieron las recomendaciones recogidas en el Manual. Una longitud del orden del 1.5-2 veces la de los estanques de la rampa (Le= 3.7m), por lo que se adoptó una longitud de 6 m con lecho horizontal dispuesto 0.3 metros por debajo de la cota del lecho del río.

Para delimitarlo, se utilizaron bolos que en su cota superior alcanzan, al menos, la cota de la lámina de agua de la hilada inferior correspondiente al caudal QR(y=0). En este caso se utilizaron bolos con altura vista de 0.5 m.

En el 50% de las ventanas de flujo de este estanque se redujo su capacidad de desagüe entre un 20 y un 30%. Esta reducción se consiguió disminuyendo la anchura de la ventana en ese porcentaje respecto a la que presentan las ventanas de la rampa. En este caso se consideraron anchuras de ventana de 0.45m en los bordes del estanque más próximos al desagüe del aliviadero, para reforzar el efecto llamada en esta zona.

Figura 5. Vista aérea de la rampa con indicación del estanque de encuentro.

b) Hilada de control

Como se comentó anteriormente fue necesario disponer una hilada de control (Figura 6) en la losa ubicada aguas abajo del azud en la zona del aliviadero, con el objetivo de redireccionar el flujo evacuado por el vertedero del azud favoreciendo el efecto llamada. Se utilizaron bolos de dimensiones sensiblemente superiores a los del estanque de encuentro con ventanas más amplias.

Figura 6. Vista aérea de la rampa con indicación de la hilada de control.

c) Adecuación de la toma

Se construyó un canal lateral para la toma, con una compuerta de regulación en la entrada y una rejilla de protección (Figura 4). Se sustituyó también la tubería de aspiración ampliando su longitud a la nueva cota de derivación.

d) Función social

Para favorecer la función social, educativa y de divulgación, en la margen derecha del río se dispuso un mirador con carteles informativos sobre la actuación.

e) Integración ambiental

El lecho de la rampa (Figura 7) se naturalizó con materiales de granulometría diversa y los muros laterales se encacharon en piedra.

Figura 7. Vista de la rampa con el lecho naturalizado y los muros laterales encachados.

f) Seguimiento hidráulico

La rampa está siendo monitorizada para diferentes condiciones de caudal con el objetivo de realizar un seguimiento que permita conocer el funcionamiento hidráulico, corroborar la secuencia de cálculo propuesta y extrapolar resultados para futuras actuaciones. En la Figura 8 se recogen los resultados de una campaña de monitorización de la rampa de El Pardo, donde se registraron calados y velocidades en las ventanas de flujo (zona entre dos bolos) y en puntos intermedios de los módulos, tanto en la zona de flujo ascendente (sombreadas en azul) como descendente (sombreadas en amarillo). La medición se realizó el 25 de junio de 2019 con un caudal circulante por la rampa de 2.15 m^3/s, un caudal total por el río de 2.37 m^3/s y de 0.23 m^3/s por el vertedero del azud. El valor de Δh se estimó en aproximadamente 18 cm. La velocidad se estimó con un molinete tipo Global Water FP101 de precisión ±0.1m/s y el calado con una escala graduada de precisión ±0.5 cm.

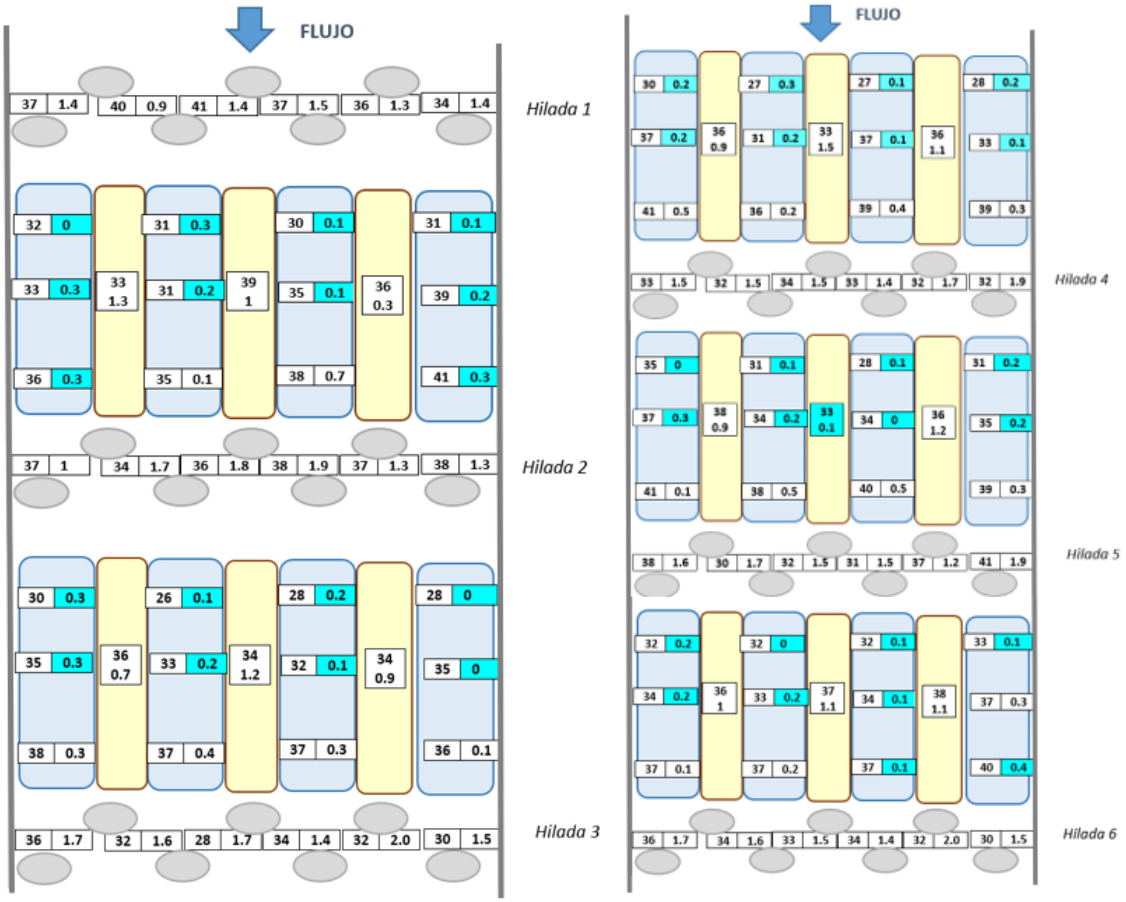

Figura 8. Resultados de la monitorización de calados y velocidades de la rampa de El Pardo. En la casilla de la izquierda se registra el valor del calado en cm y en la de la derecha la velocidad en m/s. El sombreado en azul de la casilla de la velocidad implica flujo ascendente o con velocidad cero. (La hilada 4 está aguas abajo de la 3; se muestran separadas para visualizar toda la rampa en una sola página).

Los valores registrados permiten confirmar:

- Predominio de velocidades negativas o nulas en las zonas de reposo o flujo ascendente
- Velocidades más altas en las zonas de flujo rápido, pero siempre manteniendo valores compatibles con una capacidad media de nado de la ictiofauna (<2m/s) (Valbuena Castro et al., 2016).

- Las máximas velocidades se ubican lógicamente en las ventanas de vertido, pero siempre con valores inferiores a los 2 m/s
- Los calados para los tres tipos de ubicaciones (aguas arriba y abajo del bolo y en el estanque) mostraron siempre valores compatibles con la transitabilidad de la ictiofauna (≥ 20 cm)

4. Discusión

Un aspecto singular de esta actuación es que se ubica apenas a 3 kilómetros aguas abajo de la presa de El Pardo, un obstáculo absolutamente infranqueable (Figura 8). Sin duda puede discutirse la necesidad de esta rampa, porque sólo permite recuperar esa pequeña longitud. Sin embargo, hay varias consideraciones que es necesario tener en cuenta para hacer una adecuada valoración de las funciones de este dispositivo de paso.

Figura 8. Situación del Azud con la rampa de flujo ascendente respecto a la presa de El Pardo.

Desde el punto de vista estrictamente biológico, el tramo recuperado presenta, en su parte superior, un lecho rico en gravas y cantos, que es el requerido por el barbo para la freza. El río Manzanares, como todos los que drenan la vertiente sur de la sierra del Guadarrama, es un río con su lecho ocupado de manera generalizada por arenas. Con ese sustrato dominante, los tramos con granulometrías de gravas y cantos tienen una especial relevancia ambiental para asegurar tanto la freza como el adecuado desarrollo de las puestas de los barbos. Además, el río Manzanares, aguas abajo del azud de El Pardo, entra enseguida en el tramo canalizado que atraviesa la ciudad de Madrid, por lo que la zona de frezaderos que la rampa habilita es singularmente importante.

Otra funcionalidad de la rampa es la educativa. Tener a pocos minutos del centro de Madrid una infraestructura de este tipo, es una oportunidad para que colegios, institutos, universidades y organizaciones vecinales tomen conciencia de la importancia de garantizar la conectividad longitudinal en los ecosistemas fluviales, Con ese objetivo, como ya se ha señalado, cuando se

desmanteló el camino de acceso que hubo que hacer para la construcción de la rampa, se aprovechó el tramo superior para hacer un mirador con un panel que informa de los objetivos de esta infraestructura ambiental. De hecho, durante el poco tiempo que la rampa lleva en funcionamiento, hay constancia de su notable uso educativo.

Al tratarse de la primera rampa construida aplicando una nueva metodología, también tiene mucha utilidad tanto en el ámbito de la investigación como en el de la transferencia tecnológica. Científicamente se está utilizando para monitorizar parámetros hidráulicos y biológicos, y con esos datos y las modelizaciones bidimensionales realizadas para evaluar posibles mejoras, optimizar los métodos de cálculo e incorporar mejoras en el diseño. Respecto a la transferencia, la rampa está siendo visitada por responsables de Confederaciones, Agencias del Agua y empresas de ingeniería, que quieren incorporar este tipo de dispositivo de paso para la ictiofauna a sus carteras de proyectos.

Es conveniente indicar que un correcto diseño y cálculo de la rampa es importante, pero siéndolo, no es garantía de la funcionalidad del dispositivo. Junto con esa fase de diseño y cálculo es necesario considerar, por su relevancia, las etapas de construcción, mantenimiento y seguimiento (Pedescoll et al., 2019) (Baudoin et al., 2015) (O 'Connor, Mallen-Cooper and Stuart, 2015) (Dodd, Cowx and Bolland, 2017) (BAW/BfG, 2015), etapas que escapan del alcance de esta comunicación y que el usuario necesariamente debe abordar con rigor para así poder ofrecer una solución eficaz a los problemas de transitabilidad de nuestra ictiofauna.

Por último, también es importante destacar que siendo Patrimonio Nacional el titular del azud, se ofrece un ejemplo de conciencia ambiental desde la Administración Pública, y de cooperación entre distintos ámbitos, ya que en su desarrollo ha intervenido la Administración General del Estado, la Confederación Hidrográfica del Tajo y, lógicamente, Patrimonio Nacional.

5. Conclusiones

La diversidad de nuestra red fluvial, tanto en sus condicionantes de carácter natural (hidrología, topografía, biología, etc.), como en los de carácter antrópico (accesos, tipología del obstáculo, demandas existentes, cumplimientos ambientales, etc.), es de tal complejidad, que hacen imposible que el caso presentado aborde todos los condicionantes de diseño. Por tanto, las recomendaciones recogidas en este trabajo deberán ser adaptadas por el proyectista a las peculiaridades de cada caso.

Es necesario señalar que la aplicación de la metodología de las rampas de flujo ascendente no debería abordarse exclusivamente desde una óptica hidráulica, y tampoco desde un punto de vista meramente hidrobiológico. Los dos aspectos -hidráulicos e hidrobiológicos- son esenciales e imprescindibles para alcanzar el objetivo de un adecuado diseño de este tipo de rampas y, en general, de cualquier tipo de dispositivo de paso para peces.

El diseño presentado para la rampa de El Pardo, además de garantizar la generación de estos flujos ascedentes, asegura también velocidades adecuadas en los pasos, calados mínimos en los estanques y potencias a disipar, siempre compatibles con la especie objetivo, en este caso el barbo. Además el proceso de diseño contempla un rango notable de caudales garantizando para todo él la transitabilidad.

6. Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a Patrimonio Nacional, Carlos Marcos -CH Duero-, Gustavo González, Anna Pedescoll y Rafael Aguado -Icthios-, Luis Carlos Arias, Manuel Oliva -Tragsa-, Javier Carpio -Serbaikal-, David Martínez -Alida-, Lorenzo Aguilera, Montaña Cepa y Lidia Arenillas -CH Tajo-.

7. Bibliografía

AGUILERA,L. et al.; 2019. Restauración fluvial del río Manzanares en el Real Sitio de El Pardo (Madrid). Actas del III Congreso Ibérico de Restauración Fluvial. pp.416-424

BAUDOIN, J.,BURGUN,V.; CHANSEAU, M.; LARINIER, M.; OVIDIO, M.; SREMSKI, W.; STEINBACH, P.; VOEGTLE,B.*;* 2015. Assessing the passage of The ICE protocol for ecological continuity Concepts , design and application. *The French National Agency for Water and Aquatic*

BAW/BfG; 2015. Guideline Upstream Fishways on German Federal Waterways. 85 páginas

COOPER, A. R. *et al.;* 2017. Assessment of dam effects on streams and fish assemblages of the conterminous USA. *STOTEN*. Elsevier B.V., 586, pp. 879–889. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.067.

DODD, J. R.; COWX, I. G; BOLLAND, J. D.; 2017. Efficiency of a nature-like bypass channel for restoring longitudinal connectivity for a river-resident population of brown trout. *J. Environ. Manage*. Elsevier Ltd, 204, pp. 318–326. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.09.004.

FAO/DVWK (2002) *Fish Passes: Design, Dimensions and Monitoring*, *Fish passes. Desing, dimensions and monitoring.* Edited by FAO. Rome.

FERNÁNDEZ, J.A.; MARTÍNEZ, C.; 2021. Manual de diseño de rampas con flujo ascendente. Confederación Hidrográfica del Duero. 116 páginas. Disponible en cipriber.eu

FRANKLIN, P. ; GEE, E.; BAKER, C.; BOWIE, S.; 2018. *Fish Passage Guidelines for structures up to 4 metres*. Edited by National Institute of Water & Atmospheric Research. Hamilton.New Zeland

FULLER, M. R.; DOYLE, M. W.; STRAYER, D. L.; 2015. Causes and consequences of habitat fragmentation in river networks. , *Ann. N. Y. Acad. of Sci.* 1355(1), pp. 31–51. doi: 10.1111/nyas.12853.

MCINTYRE, P. B. *et al.* (2015) *Conservation of migratory fishes in freshwater ecosystems*, *Conservation of Freshwater Fishes*. Edited by G. Closs, M. Krkosek, and J. Olden. Cambridge University Press. doi: 10.1017/cbo9781139627085.012.

O 'CONNOR, J., MALLEN-COOPER, M. AND STUART, I. (2015) *Performance, Operation and Maintenance Guidelines for Fishways and Fish Passage Works*. Technical Report Series No. 262 for the Water and Catchments Group, Department of Environment, Land, Water and Planning.

PEDESCOLL *et al.* (2019) 'Performance of a Pool and Weir Fishway for Iberian Cyprinids Migration: A Case Study', *Fishes*, 4(3), p. 45. doi: 10.3390/fishes4030045.

SANZ-RONDA, F. J. *et al.* (2013) 'Pasos para peces : escalas y otros dispositivos de paso', *Notas técnicas del CIREF*, 7, p. 17.

U.S. FISH AND WILDLIFE SERVICE (2017) *Fish Passage Engineering Design Criteria*. Hadley,

Massachusetts: USFWS, Northeast Region R5.

VALBUENA CASTRO, J. *et al.* (2016) *Manual para la evaluación de la funcionalidad de pasos para peces de estanques*. Valladolid: Confederación Hidrográfica del Duero.

XU, J., WANG, X., XUAN, G., ZHENG, F., HUANG, Y.. (2017). Physical model test study on nature-like fishways. *Advances in Water Science*. 28. 879-887. 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.06.009.

ZHENG, T., ZHIPAN, N. SHUANGKE,S. JIAYUE,S., HAITAO,L., GUANGNING, L. (2020). Comparative Study on the Hydraulic Characteristics of Nature-Like Fishways. *Water*. 12. 955. 10.3390/w12040955.