



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1738

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza





¿EL TAMAÑO IMPORTA? LAS RAMPAS CON FLUJO ASCENDENTE NOS DICEN QUE SÍ

CARRERO-DÍEZ, L. (1), MARTÍNEZ SANTA-MARÍA, C. (1) y FERNÁNDEZ-YUSTE, J.A. (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 Nováis, 10, 28040 Madrid.

Resumen

La eficiencia de los pasos piscícolas depende de las variables hidráulicas generadas en los pasos y de las capacidades natatorias de las especies. Las rampas naturalizadas de flujo ascendente exhiben un rendimiento hidráulico distintivo al inducir flujos de sentido contrario al flujo principal, lo que permite a los peces remontar la rampa minimizando su gasto energético.

En este estudio se ha utilizado un modelo numérico 2D para evaluar el impacto que tienen distintos parámetros de diseño -tamaño y forma de los bolos- sobre variables hidráulicas clave en la funcionalidad de una rampa de flujo ascendente.

Los resultados del modelo permitieron caracterizar hidráulicamente los corredores ascendentes. En cuanto a la importancia del tamaño y la forma de los bolos que conforman la rampa, los datos revelaron que: (1) los mayores incrementos del módulo de la velocidad ascendente se consiguen duplicando el tamaño de los bolos y (2) con la forma trapezoidal se amplía la superficie que ocupan las áreas con flujo ascendente en la rampa.

Estos resultados suponen un apoyo a proyectistas de este tipo de rampas ya que permiten incorporar estas mejoras geométricas en las etapas de diseño y cálculo.

Palabras clave

Rampa naturalizada, pasos para peces, conectividad longitudinal, modelo Iber.

1. Introducción

La medida más comúnmente usada para restaurar la conectividad longitudinal de los ríos es la construcción de pasos para peces. Dentro de la gran variabilidad de tipologías de dichos pasos (4-6), las rampas naturalizadas han demostrado ser un sistema de paso alternativo con una eficacia comparable a la de los pasos técnicos (ZHENG et al., 2020). Durante los últimos 10 años, este tipo de rampas ha sido ampliamente estudiado, tanto desde el punto de vista experimental (BAKI et al., 2014; CASSAN et al., 2014; GOLPIRA et al., 2020) como numérico (BAKI et al., 2016; MIRANDA et al., 2021). En la mayoría de estos estudios se analizan la relación existente entre la velocidad máxima que se alcanza en la rampa, condición que se da en la ventana de paso entre dos bolos, como variable que determina la transitabilidad de la ictiofauna (BAUDOIN et al., 2015; BRETÓN et al., 2013; DVWK, 2002; TUREK et al., 2016), y la densidad, tamaño y forma de los bolos. Pero hay una laguna de conocimiento en lo que concierne al camino hasta llegar a la ventana de paso, ya que actualmente la transitabilidad de ese recorrido se evalúa cuantificando únicamente la potencia disipada en el estanque (entre dos ventanas de paso sucesivas).



Respecto a la distribución de los bolos en la rampa, un nuevo diseño ha sido recientemente desarrollado: las rampas con flujo ascendente (FERNÁNDEZ-YUSTE y MARTÍNEZ, 2021). Estas rampas, aun manteniendo todos los elementos de una rampa tradicional, son capaces de inducir flujos ascendentes en los estanques debido a la distribución particular en zig-zag de los bolos dentro de las hiladas. La trascendencia de estos flujos ascendentes es incuestionable, pues en muchas ocasiones el pez podría remontar la rampa aguas arriba empujado por estos flujos y sólo puntualmente debería impulsarse para superar la ventana de paso entre dos bolos. Actualmente estas rampas están siendo diseñadas basándose en ecuaciones unidimensionales actualizadas, considerando un flujo no uniforme (FERNÁNDEZ-YUSTE y MARTÍNEZ, 2021; FUENTES-PÉREZ et al., 2016).

2. Objetivos

En este trabajo se estudió la eficiencia hidráulica de 4 diseños de rampa con flujo ascendente usando el modelo bidimensional Iber con el objetivo de contestar a la siguiente pregunta: ¿El tamaño de los bolos puede influir en la formación de corredores con flujo ascendente?

Los resultados de este estudio serán útiles a los técnicos que proyectan pasos para peces ya que optimizar el diseño de este tipo de rampas se traduce en una mejora de la eficiencia de paso y por tanto del éxito de la transitabilidad de la ictiofauna.

3. Metodología

En este estudio, se ha investigado la eficiencia de diseño de una rampa de flujo ascendente combinando un modelo físico y un modelo numérico. Los resultados del modelo experimental se han usado para validar el modelo numérico y éste se ha empleado para analizar con más detalle los patrones de flujo dentro de la rampa y valorar su rendimiento hidráulico bajo distintas opciones de diseño.

3.1 Modelo físico

La primera rampa con flujo ascendente se construyó en el 2019 para permeabilizar el azud de El Pardo, en el río Manzanares (Datum ETRS89 40°31'26"N, 3°46'52"W) en Madrid, España. Esta rampa tiene 26 metros de largo por 8 metros de ancho y esta dividida en 5 estanques uniformes de 2.5 m de longitud conectados mediante 6 hileras de bolos dispuestos en zigzag. La rampa fue diseñada de acuerdo a las indicaciones que ofrece el asistente para el diseño y cálculo de rampas con flujo ascendente (<https://rampas.chduero.es/>) (FERNÁNDEZ-YUSTE y MARTÍNEZ, 2021a) y en su ejecución hubo que adaptar algunas de las dimensiones de los bolos a las características inherentes del material que se usó en la obra (material granítico de cantera). En el diseño se consideraron bolos con un diámetro en la dirección transversal al flujo (D_b) del orden de 0.8 m, con una anchura (W_b) de 0.6 m y un ángulo de desplazamiento en zigzag entre dos bolos consecutivos de 30 grados con una distancia geométrica (W_G) entre ellos de 0.5 m. La pendiente de la rampa es del 3% asumiendo una diferencia de cota de lámina de agua entre dos estanques consecutivos (Δh) de 0.15 m. Una descripción más detallada de la rampa se encuentra en FERNÁNDEZ-YUSTE y MARTÍNEZ, 2021.



La campaña de campo se realizó en la primavera de 2024 garantizando que el caudal circulante se mantuviera constante siendo éste de $1.08\text{m}^3/\text{s}$ y la diferencia de cota de lámina de agua entre dos estanques consecutivos (Δh) de 0.15 m. La estrategia de muestreo se adecuó a los parámetros a medir y al objetivo del estudio, aplicando un muestreo estratificado centrandó las mediciones en aquellas áreas que presentaban distintos patrones de la variable velocidad. Esta estratificación permitió optimizar el trabajo de campo reduciendo el número de muestras, pero garantizando al mismo tiempo que las variaciones clave de la velocidad fueran capturadas con precisión. En los 62 puntos seleccionados se midieron: las coordenadas x,y,z (ETRS UTM 30N), el calado (h), el valor medio de la componente longitudinal al flujo de la velocidad (v_x), el valor medio de la componente transversal al flujo de la velocidad (v_y) y la cota de lámina de agua (WSL). Las coordenadas y la cota de lámina de agua se tomaron con un GPS Leica Zeno 20 con RTK con AS10. Los calados se obtuvieron con una regla rígida graduada en milímetros tomando el valor medio de los valores observados durante 60 segundos de medida. Se utilizó un velocímetro acústico doppler 2D para capturar las velocidades medias medidas durante 180 segundos tomadas en un plano a $1/3$ de la superficie libre.

3.2 Modelo numérico

La rampa del El Pardo se simuló usando el modelo de fluidos computacional IBER 3.3.1 (BLADÉ et al., 2014). IBER es un modelo hidráulico bidimensional (2D) que resuelve, integrando en la vertical, las ecuaciones de Navier-Stokes (3D-RANS) y al cual, para este estudio, se le ha añadido el módulo de turbulencia que utiliza el modelo $k-\epsilon$ desarrollado por RASTOGI & RODI, 1978.

El dominio de la rampa de El pardo incluye 5 estanques y 4 hileras de bolos. Este dominio está representado por el modelo digital de elevaciones (MDE) de la rampa, que se obtuvo usando un laser scann terrestre con una precisión de 2 cm y procesado con el software LiDAR 360. El primer estanque fue considerado como estanque de acomodación y no se recogieron datos de las variables para evitar la influencia de las condiciones de contorno en la entrada al sistema. A esta configuración de la rampa de El Pardo se la denominará a partir de ahora “Diseño Pardo” (DP).

Todas las simulaciones se han llevado a cabo con la premisa de alcanzar el régimen estacionario para una condición de contorno a la entrada de $1.08\text{m}^3/\text{s}$ y una cota de lámina de agua a la salida de 596.42 m, estando así en concordancia con las condiciones encontradas en las medidas en campo.

Para la resolución del modelo se ha usado una malla de cálculo estructurada con elementos cuadráticos de 0.05 m. El tamaño de las celdas se definió teniendo en cuenta la distancia geométrica entre bolos (WG), una relación de $1/10$. De este modo se asegura que los resultados no se ven afectados por la difusión numérica (BOMBAC et al., 2014) permitiendo una buena definición de la geometría y minimizando el error en la discretización del dominio.

Con el objetivo de buscar la mayor eficiencia hidráulica de este tipo de rampas, se modificó la geometría de la rampa DP, variando el tamaño y forma de los bolos. De tal forma que se diseñaron 3 configuraciones más, todas ellas siguiendo las instrucciones del asistente para el cálculo de rampas con flujo ascendente (Figura 1):

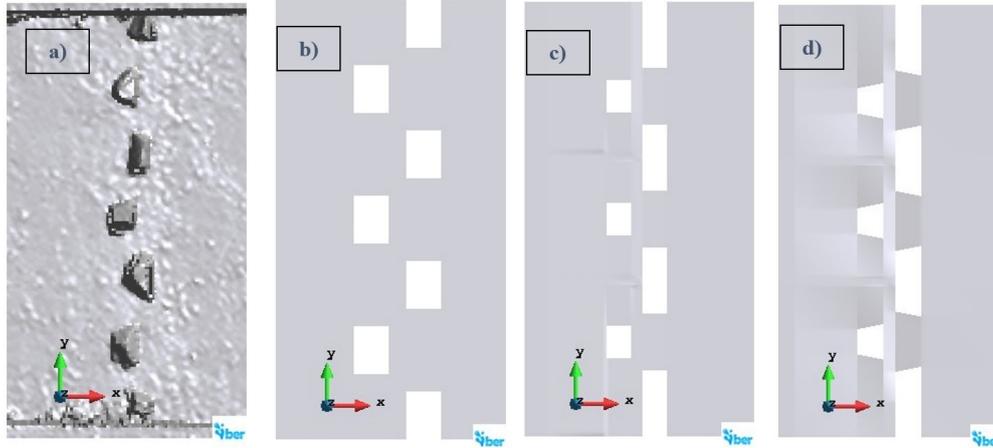


Figura1. Detalle de la configuración de los bolos dentro de la hilada en los diseños de rampa: diseño de la rampa de El Pardo (a); diseño con bolos rectangulares (b); diseño con bolos rectangulares y doble tamaño (c); y diseño con bolos trapezoidales y doble tamaño (d).

- Diseño rectangular (DR). Reproduce la configuración de la rampa DP modificando la forma de los bolos. Se diseñaron bolos con geometría rectangular con D_b de 0.7 m y una W_b de 0.5 m manteniendo la anchura de ventana geométrica de 0.35 m con un ángulo de desplazamiento de 45 grados. Para esta configuración la anchura de rampa alcanzó los 6.4 m.
- Diseño doble rectangular (DDR). De forma alternante, en cada hilera uno de cada dos bolos duplicaba su diámetro (los bolos situados en la fila inferior de la hilera) mientras que el resto de dimensiones se mantenían igual. Esta configuración supone un aumento en la anchura de la rampa hasta los 9.2 m.
- Diseño doble trapezoidal (DDT). Reproduce la configuración DDR pero la forma de los bolos corresponde con un trapecio de lado mayor 0.7 m y lado menor 0.5 m para los bolos pequeños mientras que los bolos de tamaño doble duplicaban estas medidas. En este caso la anchura de la rampa llegaba a los 8.75m.

3.3 Calibración

Una vez que en una rampa se alcanza un calado mínimo, el parámetro crítico que determina el éxito de su transitabilidad es la velocidad del flujo. El diseño de rampa propuesto en este estudio fue el resultado de intentar optimizar los pasillos de flujo ascendente, lo que supone maximizar el módulo de la velocidad y la superficie que ocupan dichos pasillos. Es por ello que este trabajo se centra en la componente del vector velocidad longitudinal al flujo (v_x) como variable a calibrar.

El coeficiente de rugosidad puede tener un impacto significativo en la precisión de un modelo hidráulico, especialmente cuando se están simulando la magnitud y



distribución de la velocidad en una rampa naturalizada. Si la rugosidad no está correctamente calibrada, el modelo puede llevar a sobre o infra valorar este parámetro (HENDERSON, 1966). El proceso de calibración se inició con la selección de 42 puntos del muestro en campo, distribuidos entre los estanques 2, 3 y 5 de la rampa, y situándose a un tercio de distancia de la longitud del estanque respecto a la posición de la hilera de bolos. El rango de valores del coeficiente de rugosidad utilizado para la calibración va desde 0.032 hasta 0.045, valores que ofrecen las tablas del coeficiente de Manning para el material del que está construida la rampa (lecho acorazado naturalizado con cantos rodados). El coeficiente de rugosidad fue ajustado iterativamente hasta que los valores de velocidad (v_x) aportados por el modelo para la configuración DP coincidían con los tomados en campo. Los resultados de la modelización fueron exportados a formato ráster y tanto el análisis comparativo final como la visualización de valores se realizó con los programas ArcGis Pro y Excel. En este caso se calculó el valor mediano del ráster velocidad escogiendo los valores de los píxeles que se encontraban a un radio de 10 cm alrededor del punto muestreado en campo. Y para la calibración se determinó el coeficiente de determinación (R^2) entre dichos valores y los recogidos en campo para valorar la bondad del ajuste.

Todos los valores del coeficiente de rugosidad probados en las distintas simulaciones arrojaron valores de R^2 superiores a 0.7. Sin embargo, el mejor ajuste se obtuvo con un valor de 0.045 alcanzando un R^2 de 0.79 con un error cuadrático medio de 0.07. Es por ello que utilizó el coeficiente de rugosidad de 0.045 en todas las simulaciones.

3.4 Variables hidráulicas

Cambios en las condiciones hidráulicas, como son el calado y la velocidad del flujo sirven a los peces como indicadores para identificar las vías de migración en los ríos (KATOPODIS & WILLIAMS, 2012). Estas variables deben ser cuidadosamente consideradas cuando se diseñan pasos para peces ya que hay que asegurar que éstos sean fácilmente transitables. El diseño y dimensionamiento de la rampa de este estudio se pensó con el objetivo claro de crear zonas donde el flujo discurriera en sentido ascendente y, aunque las simulaciones ofrecen valores de la velocidad (v_x) en cada una de las celdas de cálculo de la malla, los resultados se van a presentar por corredor. Se entiende por corredor aquella zona que se diferencia de la contigua en base a que la componente vector velocidad en la dirección del flujo en dicha área sea ascendente o descendente. Debido a la configuración en zigzag de los bolos, la rampa esta dividida en 7 corredores donde valores de v_x positivos indican flujos descendentes y valores de v_x negativos indican flujos ascendentes.

4. Resultados

4.1 Patrones de flujo en los estanques

Independientemente de los diseños simulados, se observaron dos patrones de flujo claramente diferenciados: unas zonas dónde el flujo está caracterizado por velocidades manifiestamente descendentes (v_x positivos), y otras zonas dónde, debido al efecto de la recirculación del flujo, se observan velocidades visiblemente ascendentes (v_x negativos). Una vez realizado un análisis de diferencias (test de

Kruskal-Wallis) con los valores de v_x de los estanques 2-4, se utilizó la prueba de Dunn-Bonferroni para contrastar dichas diferencias con los datos obtenidos del diseño de la rampa DP. El test confirmó ($p\text{-value} > 0,05$) la distinción de tres zonas: zonas (colores rojo-anaranjados) con velocidades claramente descendentes ($v_x \geq 1$ m/s); una segunda región (colores verdosos) con velocidades que, aun siendo descendentes eran bajas ($0 < v_x < 1$ m/s); y una tercera zona (colores azulados) donde las velocidades eran ascendentes ($v_x \leq 0$ m/s). Esta información se utilizó para distinguir tres regiones: los corredores de descenso, los corredores intermedios y los corredores de ascenso (Figura 2).

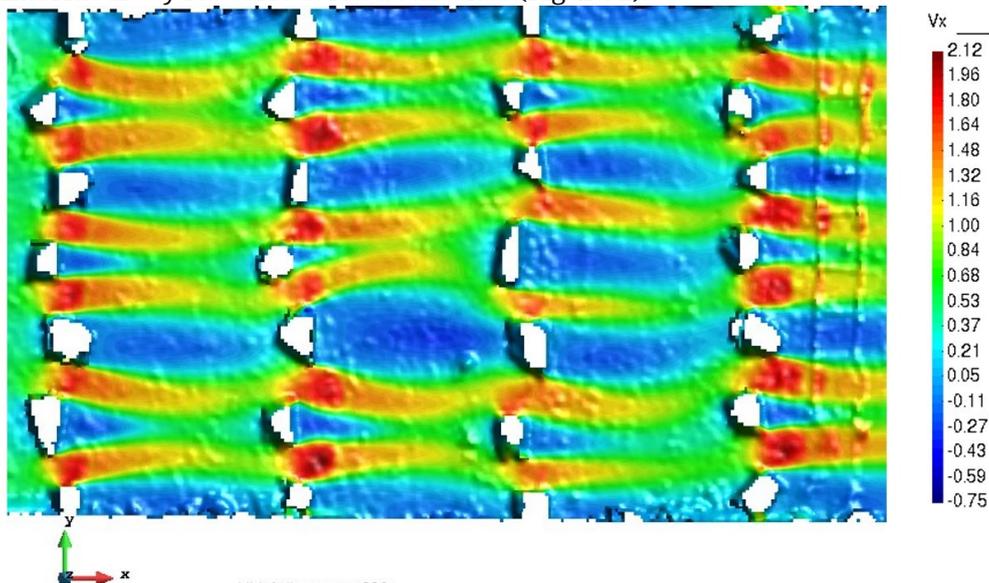


Figura 2. Distribución de los distintos corredores en función de la componente del vector velocidad en la dirección del flujo en la rampa de El Pardo. Corredores descendentes representados en colores rojo-anaranjados, corredores intermedios representados en colores verdosos, y en colores azulados se muestran los corredores ascendentes.

Para completar el análisis se estimó la velocidad mediana en cada uno de los corredores y la superficie que ocupan respecto a la superficie del estanque. Los datos muestran que en el 21% de la superficie se generan flujos ascendentes que, como valor mediano del módulo de la velocidad alcanza un valor de 0.1 m/s. Si se distinguen los corredores exteriores, como aquellos que limitan con los muros cajeros de la rampa, de los interiores, se observa que el rango de velocidades ascendentes en los primeros abarca de 0 a 0.24 m/s, mientras que en los interiores el rango va de 0 a 0.7 m/s. Respecto a los corredores intermedios -velocidades descendentes bajas ($0 < v_x < 1$ m/s) - éstos ocupan un 55% de la superficie, la cual se divide a partes iguales en zonas donde la velocidad es muy pequeña, con valores medianos de 0.2 m/s, y zonas donde ese valor llega a los 0.7 m/s. Por último, por la superficie restante (24%) circulan flujos descendentes con velocidades medianas de 1.3 m/s, con un valor máximo de 2.1 m/s.

4.2 Influencia del diseño en los valores de la velocidad

Los resultados confirman que hay una fuerte relación entre los diseños y la superficie de la rampa ocupada por corredores con velocidades ascendentes (Figura 3).

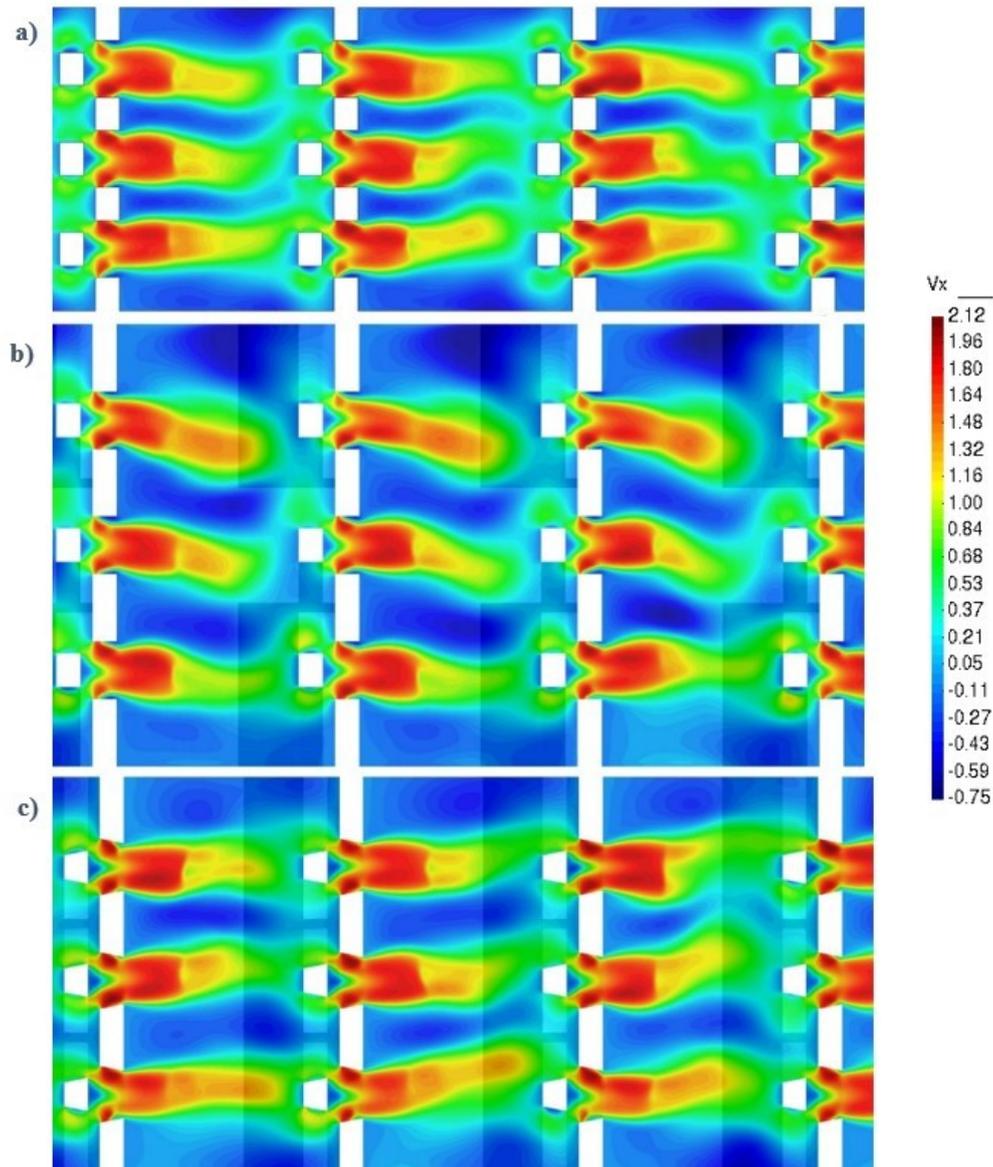


Figura 3. Distribución de los distintos corredores en función de la componente del vector velocidad en la dirección del flujo en los distintos diseños de rampa. Imagen a) diseño con bolos rectangulares, b) diseño con bolos rectangulares y doble tamaño y c) diseño con bolos trapezoidales y doble tamaño. Los corredores descendentes están representados en colores rojo-anaranjados, corredores intermedios en colores verdosos, y en colores azulados se muestran los corredores ascendentes.

Mientras que en todos los diseños los corredores con velocidades ascendentes son mayores cerca del contorno de los estanques, es bajo la protección de los bolos de la fila inferior de la hilera donde este efecto se manifiesta más claramente con algunos diseños. Este hecho se confirma con los datos del porcentaje de superficie de la rampa por el que circulan esos flujos ascendentes (Tabla 1). En la tabla se puede ver como una geometría regular de los bolos (diseños DR, DDR, DDT) potencia el tamaño de los corredores ascendentes, pasando de ocupar el 20.8% de la superficie de la rampa en el caso de geometrías adaptadas al material del bolo (diseño DP) a llegar a ocupar cerca del 30% con los otros diseños. A esto hay que añadir que las geometrías donde se ha duplicado el tamaño del bolo consiguen

elevar el módulo de la velocidad ascendente (su valor mediano) un 60%.

Tabla 1. Porcentaje del área del estanque ocupada por los distintos tipos de corredores (Área) y velocidad mediana (vx). Se ofrecen ambos valores para cada tipo de diseño: diseño de la rampa de El Pardo (DP); diseño con bolo rectangular (DR); diseño con doble bolo rectangular (DDR); y diseño con doble bolo trapezoidal (DDT).

Tipo de corredor	DP	DR	DDR	DDT					
Área (%)	vx (m/s)	Área (%)	vx (m/s)	Área (%)	vx (m/s)	Área (%)	vx (m/s)	Área (%)	vx (m/s)
Descendente	vx>1m/s	24.1	1.26	30.5	1.48	21.8	1.51	24.1	1.46
Intermedio	(0< vx <1m/s)	55.1	0.49	39.9	0.56	50.6	0.35	45.6	0.40
Ascendente	vx<1m/s	20.8	-0.10	29.7	-0.07	27.6	-0.16	30.3	-0.16

Si además se tiene en cuenta la anchura de cada rampa, los valores indican que cuando los diseños contemplan bolos simples, como en los diseños DP y DR, la relación superficie ocupada por corredores con velocidades ascendentes o muy bajas (menores de 0.5m/s) y anchura de rampa es de 3.1 y 4.9 m²/m respectivamente. Mientras que en los diseños que incorporan doble tamaño de bolo (DDR y DDT) estos valores alcanzan los 5.4 y 5.6 m²/m. Lo que indica que, a igualdad en la forma del bolo, el aumentar el tamaño del mismo implica incrementos del orden del 9% de la superficie de estas zonas por metro de anchura de rampa construida, y del 12.5% si la forma de los bolos es trapezoidal.

5. Discusión

En este apartado se discutirá la pregunta clave en este estudio: ¿Tiene el tamaño de los bolos alguna influencia sobre la formación de los corredores ascendentes que es la razón de ser de este tipo de rampas?

Como se ha mencionado en la introducción, los patrones de flujo en las rampas son de gran importancia ya que son los que sirven de guía a los peces para su paso. Y es la variable velocidad (BRETÓN et al., 2013) la que afecta en primera medida al esfuerzo que tienen que realizar éstos para superar el obstáculo. CLAY, 2019 sugiere que, cuando se diseña un paso para peces, es necesario localizar áreas dentro de éstos donde la velocidad sea baja y valorar como estas áreas pueden influir en el comportamiento de los peces y por ende en la eficacia del paso. Si se tiene en cuenta estas áreas, en términos del módulo de la componente vector velocidad en la dirección del flujo, el elemento del diseño que tiene una mayor influencia es, sin duda, el tamaño del bolo. En los diseños dónde se duplica su tamaño, se llega a multiplicar por 2.3 su valor, aumentando la velocidad con que los peces pueden ser empujados para subir la rampa.

Con respecto a la superficie que ocupan los corredores con velocidades



ascendentes dentro de la rampa, hay que resaltar que no sólo el tamaño del bolo importa, sino también su forma, ya que son las rampas con doble bolo y forma trapezoidal las que mayor superficie por anchura de rampa ofrecen. Este resultado está en concordancia con lo que expone MIRANDA et al., 2021 donde indica que la forma de los obstáculos en las rampas naturalizadas es un parámetro muy importante en su diseño.

6. Conclusiones

Se ha estudiado experimental y numéricamente distintos diseños de rampa con flujo ascendente para comprobar si el tamaño y la forma de sus bolos tenían algún efecto en la funcionalidad hidráulica de la rampa. Los resultados confirman la importancia de las dimensiones de los bolos en la generación de los flujos ascendentes. Además, los resultados también revelaron que el uso de modelos hidráulicos 2D son aptos para identificar áreas donde las velocidades en la dirección del flujo se manifiestan ascendentes.

La relevancia de estos resultados y su aplicación se acrecienta con la reciente aprobación de la Ley de Restauración de la Naturaleza, que ha puesto como uno de sus objetivos prioritarios recuperar la conectividad longitudinal en 3000km en España, según queda recogido en la “Estrategia Nacional de Restauración de Ríos (2022-2030)”.

7. Bibliografía

- BAKI, A. B. M.; ZHU, D. Z.; RAJARATNAM, N.; 2014. Mean Flow Characteristics in a Rock-Ramp-Type Fish Pass. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000816](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000816)
- BAKI, A. B. M.; ZHU, D. Z.; RAJARATNAM, N.; 2016. Flow simulation in a rock-ramp fish pass. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(10), 1–12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001166](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001166)
- BAUDOIN, J.-M.; BURGUN, V.; CHANSEAU, M.; LARINIER, M.; OVIDIO, M.; SREMSKI, W.; STEINBACH, P.; VOEGTLE, B.; 2015. Assessing the passage of obstacles by fish. Concepts, design and application. *The French National Agency for Water and Aquatic Environments*, 200. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/183173>
- BLADÉ, E.; CEA, L.; CORESTEIN, G.; ESCOLANO, E.; PUERTAS, J.; VÁZQUEZ-CENDÓN, E.; DOLZ, J.; COLL, A.; 2014. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- BRETÓN, F.; BAKI, A. B. M.; LINK, O.; ZHU, D. Z.; RAJARATNAM, N.; 2013. Flow in nature-like fishway and its relation to fish behaviour. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(6), 567–573. <https://doi.org/10.1139/cjce-2012-0311>
- CASSAN, L.; TIEN, T. D.; COURRET, D.; LAURENS, P.; DARTUS, D.; 2014. Hydraulic Resistance of Emergent Macroroughness at Large Froude Numbers: Design of Nature-Like Fishpasses. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(9). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000910](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000910)
- DVWK.; 2002. Fish Passes: Design, Dimensions and Monitoring. In FAO (Ed.), *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. <https://www.fao.org/publications/card/en/c/fc11949e-9dc5-59a1-bf10-9e9480a3fe7f/>



- FERNÁNDEZ-YUSTE, J. A.; MARTÍNEZ, C.; 2021a. *Upflow Ramps. Asistente para el cálculo de rampas de flujo ascendente*. <https://rampas.chduero.es/>
- FERNÁNDEZ-YUSTE, J. A.; MARTÍNEZ, C.; 2021b. Uphill flow rock ramp design (C. H. del DUERO (ed.)). <https://www.chduero.es/documents/20126/427605/UphillFlowRockRampDesign.pdf>
- FUENTES-PÉREZ, J. F.; SANZ-RONDA, F. J.; DE AZAGRA, A. M.; GARCÍA-VEGA, A.; 2016. Non-uniform hydraulic behavior of pool-weir fishways: A tool to optimize its design and performance. *Ecological Engineering*, 86, 5–12. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.10.021>
- GOLPIRA, A.; BAKI, A. B. M.; ZHU, D. Z.; 2020. Higher-order velocity moments, turbulence scales and energy dissipation rate around a boulder in a rock-ramp fish passage. *Sustainability (Switzerland)*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/su12135385>
- KATOPODIS, C.; WILLIAMS, J. G.; 2012. The development of fish passage research in a historical context. *Ecological Engineering*, 48. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.07.004>
- MIRANDA, F. C.; CASSAN, L.; LAURENS, P.; TRAN, T. D.; 2021. Study of a rock-ramp fish pass with staggered emergent square obstacles. *Water (Switzerland)*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/w13091175>
- RASTOGI, A. K.; RODI, W.; 1978. Predictions of heat and mass transfer in open channels. *ASCE J Hydraul Div*, 104(3). <https://doi.org/10.1061/jyceaj.0004962>
- TUREK, J.; HARO, A.; TOWLER, B.; 2016. Federal Interagency Nature-like Fishway Passage Design Guidelines for Atlantic Coast Diadromous Fishes. *Interagency Technical Memorandum*, 52. <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/28919>
- ZHENG, T.; NIU, Z.; SUN, S.; SHI, J.; LIU, H.; LI, G.; 2020. Comparative study on the hydraulic characteristics of nature-like fishways. *Water (Switzerland)*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/W12040955>