

CRITERIOS HIDRÁULICOS PARA EL DISEÑO DE RÍOS ARTIFICIALES PARA EL REMONTE DE PECES

Carolina Martínez Santa-María, José Anasatasio Fernández Yuste & Guillermo González Gordaliza

Departamento de Ingeniería Forestal. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal. Universidad Politécnica de Madrid. Campus Universitario s/n. 28040-MADRID (España). Correo electrónico: carolina.martinez@upm.es

Resumen

En los últimos años, la comunidad científica y técnica está prestando atención a los cauces artificiales naturalizados como una solución para garantizar la transitabilidad de los ríos para la ictiofauna. Estos ríos artificiales permiten salvar obstáculos de pequeña altura, azudes y pequeñas presas, y son franqueables por todo tipo de peces, ya que se construyen con pendientes suaves por lo que no requieren especiales habilidades natatorias o de salto. En este trabajo se presenta: a) la caracterización de un tipo de cauce artificial formado por una sucesión de tramos con remansos definidos por pequeños azudes que desaguan con vertedero de sección compuesta y descarga parcialmente sumergida; b) los criterios para el dimensionado de cada uno de los elementos de la secuencia estanque-vertedero; c) la aplicación de esos criterios al caso del azud del Ambroz (Aldeanueva del Camino; Cáceres).

Palabras clave: *Ictiofauna, Azud, Franqueabilidad, Diseño, Poza, Energía*

INTRODUCCIÓN

Los peces necesitan realizar movimientos periódicos de rango variable, motivados por aspectos reproductivos, alimenticios, de refugio o por la búsqueda de cualquier tipo de recurso. Azudes y presas imponen una compartimentación de los ríos que afecta gravemente a esa movilidad, y que se traducen en un descenso de los efectivos de las poblaciones, en un aislamiento genético o incluso en la desaparición de especies.

Para paliar los efectos de azudes y pequeñas presas sobre la fauna piscícola se han venido implementando distintas soluciones con el objetivo de garantizar la franqueabilidad de esas obras. En España las más utilizadas han sido las escalas de artesas (ELVIRA, 1998). Sin embargo, en los últimos años se está trabajando en la comunidad técnica y científica en una nueva

generación de soluciones que intentan resolver la transitabilidad con alternativas más naturalizadas, que además de asegurar la franqueabilidad del obstáculo para todas las especies presentes en el río, y no sólo para las que tengan unas capacidades natatorias excepcionales, ofrezcan un biotopo acuático adecuado y unas condiciones paisajísticas apropiadas (WILDMAN *et al.*, 2003). Es el caso de las rampas de rocas, útiles cuando la diferencia de cota a salvar es pequeña, y de los bypass con ríos artificiales, con los que se pueden salvar obstáculos más importantes. Esos ríos o cauces artificiales naturalizados salvan la presa mediante una secuencia de saltos y pozas, cuando la pendiente exigida por el espacio disponible es importante, o con secuencia de rápidos y remansos, cuando es posible desarrollar el cauce artificial con pendientes pequeñas (LARINIER & MARMULLA, 2003), imitando, tanto en un caso

como en otro, el comportamiento hidromorfológico observado en cauces naturales.

Como principales ventajas de este tipo de soluciones pueden señalarse:

- Ofrece unas condiciones de paso mucho más adecuadas que cualquiera de los otros tipos de escalas, tanto hacia aguas arriba como hacia aguas abajo.
- Las condiciones de remonte son muy favorables, con independencia del tamaño o especie.
- Presentar un aspecto mucho más natural.
- Permite su uso como un elemento más de evacuación de caudales, siendo, por tanto, compatible para el desagüe del caudal ecológico.
- No interfiere en la obra que salva y requiere un bajo mantenimiento.

Como inconvenientes, pueden citarse:

- Requiere espacio bastante para poder construirse, siendo prácticamente inabordable cuando la cerrada donde se sitúa la obra presenta taludes con fuertes pendientes en los estribos y en los primeros cientos de metros de desarrollo del vaso.
- Para garantizar su funcionalidad, exige caudales más importantes que las escalas de artesas o de ralentizadores.

El relativamente reciente interés por los bypass con cauces artificiales ha puesto de manifiesto la necesidad de abordar técnicamente la caracterización hidráulica de las soluciones. Sólo diseñando y dimensionando desde la base de la hidráulica se puede tener una garantía razonable

de que las condiciones de calados, velocidades, turbulencias, disipación de la energía y demás factores hidráulicos que se presentarán en el río artificial serán compatibles con las capacidades natatorias y de remonte de las especies presentes.

En este contexto se enmarca el objetivo de este trabajo: considerando el caso genérico de un bypass con río artificial, desarrollar el estudio hidráulico de un sistema formado por una sucesión de tramos con remansos definidos por pequeños azudes que desaguan con vertederos de sección compuesta y descarga parcialmente sumergida.

DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DE LA SECUENCIA ESTANQUE-AZUD

Para salvar la diferencia de cota impuesta por el obstáculo que impide la transitabilidad del río, se considera una secuencia escalonada de estanques, que imitaría a lo que en ríos naturales se conoce como secuencia salto-poza. Se ha asumido este tipo porque respecto a la alternativa definida por una secuencia rápido-remanso, requiere desarrollos en planta mucho más cortos, y así se reduce la necesidad de espacio que, como ya se ha señalado, es uno de las principales limitaciones de los cauces artificiales naturalizados como vías de paso para la ictiofauna. La secuencia está definida por pequeños azudes con vertedero compuesto parcialmente sumergido. En la Figura 1 se pueden apreciar los detalles

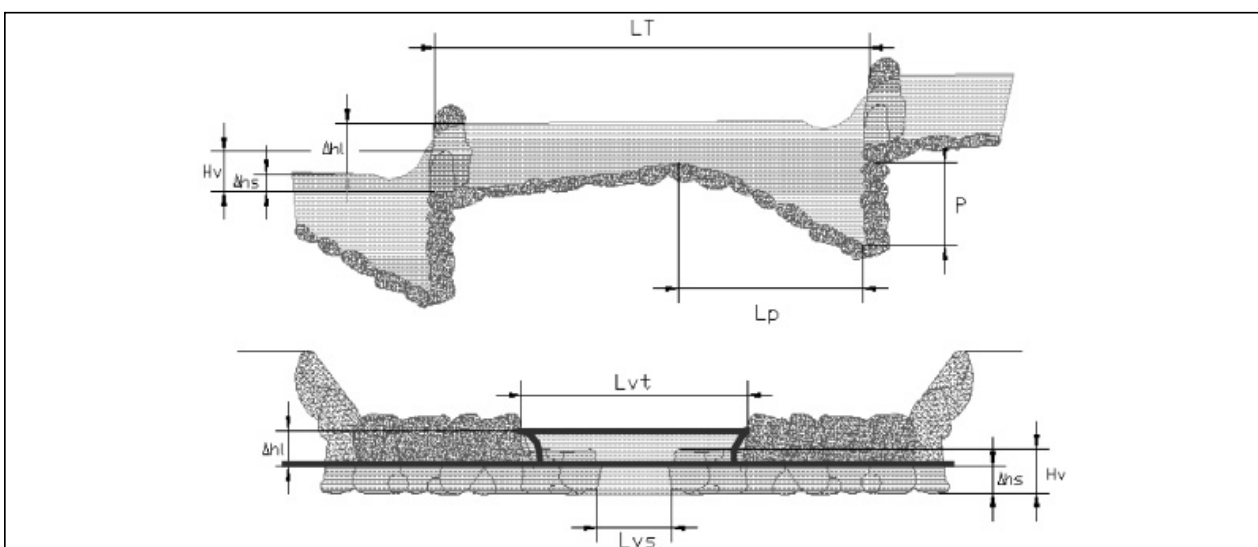


Figura 1. Sección longitudinal y transversal de la solución hidráulica propuesta

geométricos, y en la Tabla 1 se incluye la descripción de las variables que intervienen y algunas consideraciones respecto a su funcionalidad.

Este sistema permite dimensionar ríos artificiales remontables tanto por especies con capacidad de salto como por las que no la tienen. Para garantizar la franqueabilidad, los azudes deben cumplir:

- La “ventana sumergida”, deberá presentar dimensiones adecuadas que aseguren un paso cómodo y compatible con la capacidad natatoria de aquellas especies que, por carecer de capacidad de salto, necesariamente remontarán a través de este elemento del vertedero.
- Para las especies que tengan capacidad de salto, debe asegurarse que:
 - La diferencia de cota definida por la lámina vertiente en la escotadura del vertedero sea compatible con la capacidad de salto.
 - La anchura de la escotadura sea suficiente para que, en el salto, el pez entre fácilmente en el remanso de aguas arriba.
 - Disponga de una poza inmediatamente aguas abajo del vertedero, con una profundidad suficiente para que el pez pueda acometer el salto con garantías de éxito.

- La distancia entre azudes, o lo que es lo mismo, la longitud del estanque, deberá satisfacer unos valores mínimos que aseguren unas condiciones adecuadas para:
 - La disipación de la energía del flujo.
 - El mantenimiento de unos calados mínimos a lo largo del estanque
 - Asegurar la sumersión parcial del vertedero de aguas arriba, de manera que se garantice la funcionalidad de la “ventana sumergida”.
 - Ofrecer a los peces un descanso antes de afrontar el siguiente paso.

CRITERIOS PARA EL DIMENSIONADO

Vertedero compuesto parcialmente sumergido

Son muchas las variables que definen la geometría del vertedero, y para abordar el dimensionado es necesario, en primer lugar, acotar aquellas que repercuten directamente en la transitabilidad, tanto para las especies con capacidad de salto como para las que no gozan de esa capacidad. También es importante conocer cómo esas variables influyen en el caudal mínimo necesario para asegurar el funcionamiento

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	CONSIDERACIONES
Δhl	Diferencia de cota entre lámina de agua de estanques sucesivos	Su valor determina el número de azudes a disponer (N° azudes = $H/\Delta hl$, siendo H la diferencia de cota a salvar con el río artificial) y la diferencia de cota a salvar con salto por las especies que dispongan de esa capacidad.
Δhs	Altura de lámina de agua en el paso sumergido	Debe ser suficiente para asegurar el tránsito de las especies que no saltan.
Ltv	Anchura total del vertedero	Debe ser adecuado para que las especies que saltan dispongan de espacio suficiente para su caída en el estanque superior.
Lvs	Anchura del vertedero sumergido	Suficiente para permitir el paso de las especies que no saltan. No demasiado pequeño para evitar obstrucciones.
hv	Altura del umbral del vertedero que define el paso sumergido	Se debe cumplir $\Delta hs < hv < \Delta hl + \Delta hs$
LT	Longitud del tramo entre azudes	Suficiente para que el pez descanse entre cada paso y para una disipación adecuada de energía.
P	Profundidad de la poza	Adecuada para que los peces con capacidad de salto dispongan de calado para impulsarse
Lp	Longitud de la poza	Suficiente para asegurar que en ningún punto del tramo entre azudes el calado es inferior a 0.15m (condición de transitabilidad): $Lp > (0.15 - \Delta hs)/I$, siendo $I = \Delta hl/LT$

Tabla 1. Descripción de los parámetros geométricos de la solución hidráulica propuesta

hidráulico del sistema (Q_{min}). En la tabla 2 se presenta una síntesis de los dos aspectos citados: valores mínimos para asegurar la funcionalidad y efecto sobre el Q_{min} .

Como complemento a los criterios ofrecidos, se recogen a continuación algunas consideraciones adicionales:

- Si $Q < Q_{min}$
 - Δh_s disminuye y se limita el paso de las especies sin capacidad de salto
 - Δh_l se mantiene y la anchura de la ventana de salto puede reducirse hasta el valor de L_{vs}
- Si $Q > Q_{min}$
 - Δh_s aumenta y se mejoran las condiciones de paso de las especies sin capacidad de salto
 - Δh_l y L_{vs} se mantienen
- Para Δh_l dado, el caudal mínimo que asegura la transitabilidad disminuye cuando decrecen Δh_s , L_{tv} , L_{vs} y cuando aumenta h_v .
- Si el caudal circulante crece, toda la coronación del azud empezaría a funcionar como vertedero. En ese caso, si la anchura del río artificial es grande comparada con L_{tv} , grandes incrementos de caudal implican incrementos relativamente pequeños en la cota de lámina de agua, sin que se pierda funcionalidad de paso. El caudal máximo (Q_{max}) vendría determinado por aquel que llena la sección (Figura 2). La transitabilidad en este caso podría estar condicionada por la velocidad en los tramos entre azudes.
- La toma para el río artificial debe asegurar un rango de caudales $Q_{min} < Q < Q_{max}$
- Aguas abajo es necesaria una sección de control que asegure que en el primer azud

VARIABLE	VALORES MÍNIMOS	EFECTO CUANDO LA VARIABLE AUMENTA Y EL RESTO NO CAMBIAN
Δh_l: Diferencia de cota entre lámina de agua de estanques sucesivos	Depende de la capacidad de salto de las especies. Una referencia conservadora de esta variable para las especies autóctonas españolas puede ser 0,25m. (MARTÍNEZ DE AZAGRA, 1999).	<ul style="list-style-type: none"> ↓ n° de azudes y la longitud del río artificial ↑ Pendiente del río artificial ↑ Caudal mínimo (Q_{min}) necesario para el funcionamiento hidráulico del río artificial
Δh_s: Altura de lámina de agua en el paso sumergido	Aunque la transitabilidad puede estar asegurada para valores inferiores, es recomendable optar por una dimensión más conservadora que no es recomendable que baje de 0,15m.	↑ Q_{min}
L_{tv}: Anchura total del vertedero	Debe ser mayor que L_{vs} y suficiente para que las especies con capacidad de salto no tengan dificultades para incorporarse al estanque superior. Puede considerarse un valor mínimo de 0,6m.	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Q_{min} ↑ Anchura del río artificial, ya que debe haber una proporción entre L_{tv} y la anchura (<i>Herberg</i> recomienda que anchura del río artificial $< 4 * L_{tv}$)
L_{vs}: Anchura del vertedero sumergido	Para evitar obstrucciones es recomendable no considerar valores inferiores a 0,40m.	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Q_{min} El incremento es menor que el que se produce al aumentar Δh_s
h_v: Altura del umbral del vertedero que define el paso sumergido	Es un valor que debe cumplir $\Delta h_s < h_v < \Delta h_l + \Delta h_s$. Considerando las dimensiones recogidas en los párrafos anteriores, su valor debe estar entre 0,15m. y 0,40m. Como Q_{min} disminuye a medida que h_v aumenta, parece razonable asumir valores altos del rango, por lo que se recomienda un valor mínimo de 0,35m.	↓ Q_{min}
L_T: Longitud del tramo entre azudes	Suficiente para facilitar el descanso para los peces y favorecer la disipación de energía del flujo. Puede considerarse un valor mínimo de 2.5m.	↑ Longitud del río artificial

Tabla 2. Umbrales para las variables clave del diseño y su efecto sobre el caudal mínimo de funcionamiento

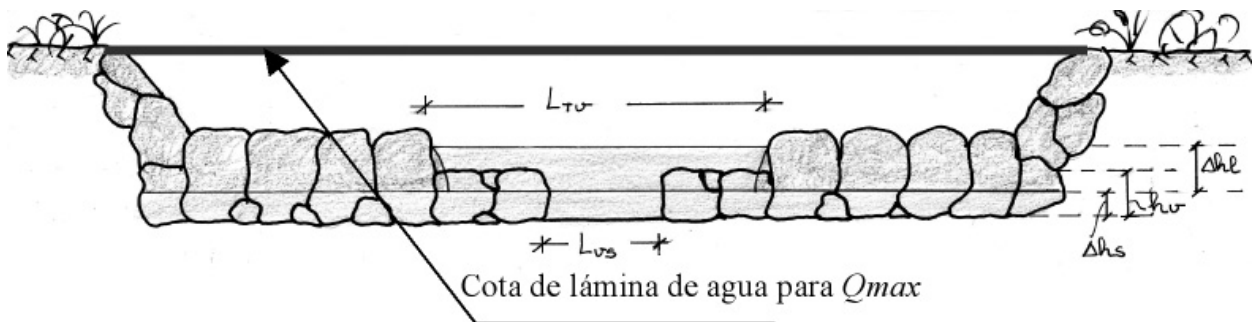


Figura 2. Caudal máximo: aquel que “llena” la sección sin desbordar

del río artificial se cumple la condición de un calado sumergido Δh_s sobre la solera de referencia.

Para la estimación del caudal desaguado por el vertedero compuesto parcialmente sumergido puede utilizarse con la siguiente ecuación (HEGBERG et al., 2001; NMFS, 2001):

$Q = Q_{\text{sección vertido libre}} (Q_{sl}) + Q_{\text{sección vertido parcialmente sumergido}} (Q_{ss})$ (ver Figura 3)

$$Q_{sl} = C_g * (L_{tv} - L_{vs}) * (\Delta h_l + \Delta h_s - h_v)^{1.5} * \sqrt{2g}$$

$$Q_{ss} = K * [C_g * L_{vs} * (\Delta h_l + \Delta h_s)^{1.5} * \sqrt{2g}]$$

$$K = \left[1 - \left(\frac{\Delta h_s}{\Delta h_l + \Delta h_s} \right)^{1.5} \right]^{0.385}$$

(C_g =coeficiente de gasto que habitualmente toma valores que se sitúan entorno a 0,4)

Para los valores mínimos recomendados anteriormente - $\Delta h_l = 0,25\text{m.}$; $\Delta h_s = 0,15\text{m.}$; $L_{vs} = 0,40\text{m.}$; $L_{tv} = 0,60\text{m.}$; $h_v = 0,35\text{m.}$; $\Delta h_l = 0,25\text{m.}$ - el caudal mínimo requerido para el adecuado comportamiento hidráulico del sistema sería de unos 170 litros/segundo.

Longitudes del tramo entre azudes (estanque) y longitud total del río artificial

Considerando los umbrales recomendados para Δh_l (diferencia de cota entre lámina de agua de estanques sucesivos) y L_T (longitud del tramo entre azudes), la pendiente correspondiente a esos valores sería $I = \Delta h_l / L_T = 0,25 / 2,5 = 0,1$. En consecuencia, si H es la diferencia de cota a salvar con el río artificial; la mínima longitud del río artificial sería $L_{R_{min}} = H / I = 10H$, y el número mínimo de azudes necesarios $N_{min} = H / \Delta h_l = 4H$.

El patrón de Δh_l y L_T no tiene por qué ser el mismo a lo largo de todo el río artificial. Siempre que se respeten los umbrales señalados, la pendiente en cada tramo entre azudes y con ella el número total de azudes, puede y debe acomodarse según convenga, bien para ajustarse a las características topográficas, bien para dar un aspecto de más naturalidad al río artificial.

Dimensionado de la poza

Para el dimensionado de la poza se siguen las recomendaciones indicadas por HEGBERG et al. (2001) y MARTÍNEZ DE AZAGRA (1999).

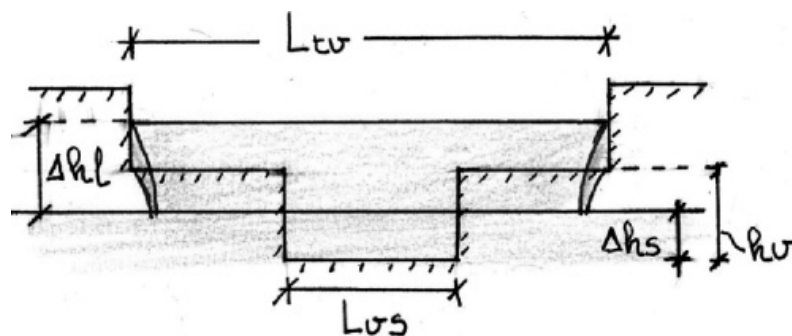


Figura 3. Variables a considerar para la estimación del caudal en el vertedero compuesto parcialmente sumergido

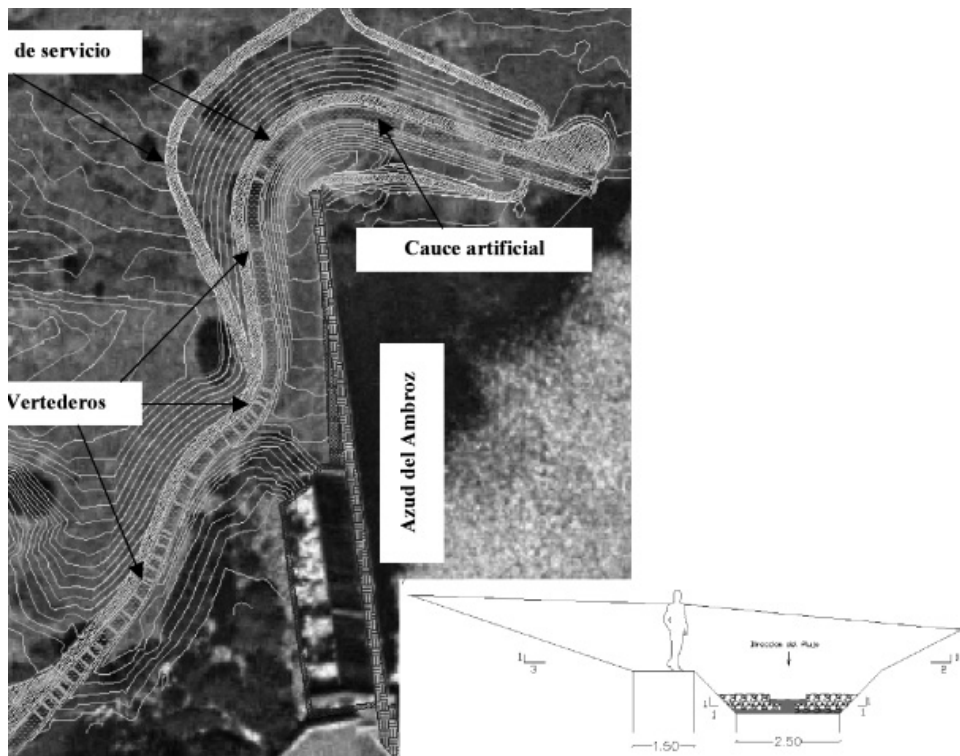


Figura 4. Planta general y sección tipo

P (profundidad) $> 3 * \Delta h_l$; A_p (Anchura de la poza) $< 4 * L_{tv}$

L_p (Longitud de la poza) $\begin{cases} < 3m \\ > (0,15m - \Delta h_s) / I \end{cases}$

La anchura de la poza se corresponderá con la anchura del río artificial. Como la condición que la define es poco restrictiva, pueden usarse relaciones de morfología fluvial para ajustar mejor esa dimensión. Esas relaciones establecen una dependencia de proporcionalidad directa entre la anchura del río y la raíz cuadrada del caudal (KNIGHTON, 1998). Para aplicar esa relación, en caudal a considerar será aquel que llena por completo el río artificial, esto es el Q_{max} .

Comprobación de la condición de disipación de potencia

La condición de disipación de potencia (MARTÍNEZ DE AZAGRA, 1999) exige que el factor de disipación (**FDP**) sea inferior a un umbral determinado en función de la especie considerada. Si para las dimensiones del estanque y su poza no se satisface, se redimensionarán para que el volumen del estanque (V_p) aumente y se satisfaga la condición $FDP < umbral$.

$$FDP = \frac{\gamma * Q * \Delta h_l}{V_p}$$

FDP= Factor de disipación de potencia ($W \cdot m^3$)

γ = Peso específico del agua ($N \cdot m^3$)

Δh_l = Diferencia de cota entre lámina de agua de estanques sucesivos (m)

V_p = Volumen del estanque (m^3)

APLICACIÓN AL AZUD DEL RÍO AMBROZ

El río Ambroz es uno de los principales afluentes por la izquierda del río Alagón. El azud aquí considerado, situado en el término municipal de Aldeanueva del Camino (Cáceres), sirve de estructura de toma de un importante canal de riego. La regulación se hace desde el embalse de Baños, situado unos pocos kilómetros aguas arriba.

La diferencia de cota entre el labio del vertedero del azud y el encachado dispuesto a la salida del disipador de energía es de prácticamente ocho metros .

Las principales poblaciones de peces presentes en el tramo del río Ambroz donde se sitúa el azud son la trucha común (*Salmo trutta*), el barbo (*Barbus bocagei*), la boga (*Chondrostoma polylepis*), el calandino (*Squalius alburnoides*), y el caho (*Squalius pyrenaicus*), todas especies con migraciones ascendentes prerreproductivas.

El cauce artificial naturalizado se ha proyectado en la margen derecha, donde hay espacio suficiente para su desarrollo. Se trata de un cauce de sección trapezoidal, de 2,50 m de ancho en la base, compuesto por una sucesión de estanques delimitados por azudes de piedra vista con vertederos de sección compuesta y descarga parcialmente sumergida.

Siguiendo los criterios expuestos en este texto, y considerando las peculiaridades topográficas y paisajísticas de la zona donde se ubica la actuación, se ha obteniendo un desarrollo total de 226 m que salva la diferencia de cota (8 m) con un total de 32 vertederos y 33 estanques con longitudes que van desde los 2,5m. hasta mas de 30m., y pendientes que oscilan desde un máximo del 10% hasta por debajo del 0,5%. En la figura 4 se presenta la planta general y la sección tipo. El proyecto se finalizó en los primeros meses de 2009, con algunas modificaciones importantes en las dimensiones de las pozas, como consecuencia de la aparición de roca a escasa profundidad. Actualmente se están evaluando los resultados obtenidos con esta actuación, que, además, está sirviendo para evacuar el caudal ecológico asignado al azud.

Agradecimientos

Este trabajo no hubiera sido posible sin la vocación y entusiasmo de Miguel Ángel Cotallo

(Servicio Forestal, Caza y Pesca de la Junta de Extremadura).

BIBLIOGRAFÍA

- ELVIRA, B. ET AL.; 1998. *Impacto de las obras hidráulicas en la ictiofauna. Dispositivos de paso para peces en las presas de España*. Organismo Autónomo Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- HEGBER, G.C. ET AL.; 2001. Natural Fish Passage Structures in Urban Streams: Part 1 – Hydrologic and Resource Issues, Part 2 – Hydraulic Design and Analysis. In: *Proceedings of the 2001 International Conference on Ecology & Transportation*. Keystone, Colorado.
- LARINIER, M. & MARMULLA, G.; 2003. Fish passes: types, principles and geographical distribution an overview. In: Robin L. Welcomme & T. Petr (eds.), *Proceedings of the second international symposium on the management of large rivers for fisheries*. Phnom Penh, Kingdom of Cambodia.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES, A.; 1999. Escalas para peces. *Publicaciones E.T.S.II.AA. Palencia* 26: 1-35.
- NATIONAL MARINE FISHERIES SERVICE SOUTHWEST REGION (NMFS); 2001. *Guidelines for salmonid passage at stream crossings*. <http://swr.nmfs.noaa.gov/hcd/NMFSSCG.PDF> (última consulta enero 2009).
- KNIGHTON, D.; 1998. *Fluvial forms and processes: A new perspective*. Arnold Publisher. London.
- WILDMAN, L. ET AL.; 2003. *An Illustrative Handbook on Nature-Like Fishways*. http://www.americanrivers.org/site/DocServer/afs_paper.pdf?docID=326 (última consulta junio 2008).