

Diseño de obras de paso compatibles con la migración de peces

GARCÍA MOLINOS, JORGE (*); LLANOS, ANTONIO (**) y MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES, ANDRÉS (***)

RESUMEN La noción de obstáculo al paso de los peces se suele asociar con la presencia de presas, azudes o barreras naturales que interrumpen la continuidad del río. Sin embargo, esta visión es parcial pues no contempla otros muchos motivos que pueden estar impidiendo la migración natural de los peces. Siempre que las condiciones hidráulicas locales en el río (velocidad, profundidad, potencia disipada, turbulencia, etc.) queden fuera del rango biológico necesario para los peces, estaremos ante una barrera infranqueable que fragmenta el hábitat necesario para la viabilidad y supervivencia de la población piscícola a largo plazo. La experiencia adquirida en otros países demuestra que ésta es una situación frecuente en los caños de drenaje, estructuras utilizadas cada vez con más frecuencia para el paso vial sobre cauces de agua. El presente artículo revisa la problemática de los caños de drenaje desde la perspectiva del paso de los peces, así como las principales medidas que pueden adoptarse para evitar o corregir estos problemas.

DESIGN OF FISH-FRIENDLY CULVERT CROSSINGS

ABSTRACT Traditionally, fish passage barriers have been associated with the presence of dams, weirs and natural obstructions that block passage to upstream habitat. However fish passage can be impeded due to less obvious reasons, such as local hydraulic conditions (velocity, depth, power, turbulence...) that are beyond the swim capability or the biological requirements of fish species. These are common situations in culverts and drainage structures frequently used as road crossings. This paper discusses the different fish passage problems commonly found in culverts and explains methods outlining a crossing analysis and tools available for improving culvert design to accommodate fish passage.

Palabras clave: Obras de drenaje transversal, Migración de los peces, Desarrollo sostenible.

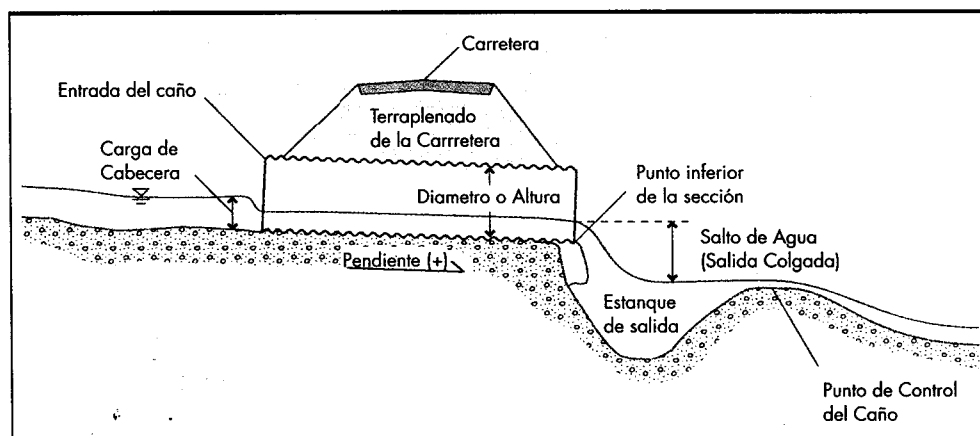


FIGURA 1. Principales componentes de un caño de drenaje y del cauce.

(*) 71.119.715-N, Ingeniero de Montes, jorgegamo@hotmail.com. UDH&H, ETS Ingenierías Agrarias (UVA), Palencia, España. 979 108358.

(**) P-203518106 Ingeniero Civil, llanos@h2odesigns.com. Michael Love & Associates, Eureka, California, USA.

(***) 16.792.147-P Dr. Ingeniero de Montes, amap@iaf.uva.es. UDH&H, ETS Ingenierías Agrarias (UVA), Palencia, España. 979 108358.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de caños de drenaje¹ en vías de comunicación (figuras 1 y 2) está generalizado en España. En comparación con los puentes tradicionales, los caños son estructuras

1 Con el término caño de drenaje ('culvert' en inglés) nos referimos de forma genérica a cualquier estructura tipo tubería o canal de sección cerrada usada para atravesar un curso de agua.

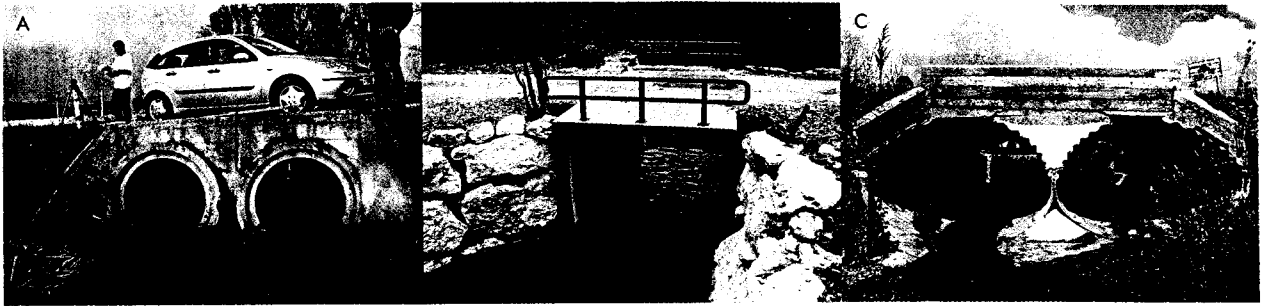


FIGURA 2. Los caños de drenaje pueden ser de múltiples formas y materiales. La figura muestra (a) un doble tubo de hormigón, (b) un caño caja de hormigón y (c) un doble caño elíptico de acero corrugado.

modulares o prefabricadas, razonablemente económicas, más sencillas de dimensionar y muy fáciles de transportar e instalar en obra. Frente a estas ventajas, la experiencia demuestra que los caños de drenaje pueden alterar las condiciones naturales del río sustancialmente, creando una barrera para el paso de los peces y otros organismos acuáticos y fragmentando el hábitat necesario para su viabilidad y supervivencia a largo plazo (Bates *et al.*, 2003; Jackson, en preparación).

La importancia del problema es grande y creciente debido a la proliferación de nuevas vías de comunicación. En Estados Unidos, por ejemplo, y más concretamente en los estados de Oregón y Washington, se han contabilizado más de 10.000 caños en ríos que albergan poblaciones piscícolas (GAO, 2001). Esta cifra es muy significativa si se relaciona con los resultados de Conroy (1997), que en su trabajo sobre distintas cuencas del estado de Washington detecta la existencia de algún tipo de bloqueo total o parcial al paso de los peces en el 75% de los caños analizados.

Hasta la fecha, este problema ha sido muy poco estudiado en España. Los únicos datos preliminares (García Molinos, 2003; García Molinos *et al.*, 2004a) son aún insuficientes para determinar con la debida fiabilidad el alcance del impacto de estas estructuras en nuestros ríos. No obstante, en el mencionado estudio se localizaron varios caños con problemas de

paso en algunos ríos de la provincia de Burgos, y se constató que su uso se está generalizando rápidamente. Por ello, y aunque la abundancia de los caños en nuestros ríos sea todavía escasa en comparación con otros países, la necesidad de concienciar a los técnicos encargados de su diseño sobre esta problemática medioambiental parece evidente.

2. PROBLEMÁTICA: CAUSAS Y CONSECUENCIAS

Los caños de drenaje son elementos artificiales que no presentan ni la rugosidad, ni la heterogeneidad ni la pendiente del cauce natural. Tienen una mayor eficiencia hidráulica que el río, por lo que en ellos el calado, la velocidad y la potencia disipada difieren de los valores naturales. Así, por ejemplo, la velocidad del agua en los caños durante las avenidas suele ser muy alta, lo que produce la socavación del lecho y márgenes del río inmediatamente aguas abajo de la estructura, creando un salto de agua que termina siendo infranqueable para los peces. Un caño es un elemento rígido instalado en un entorno muy dinámico. Muchas barreras aparecen con el transcurso del tiempo ante las nuevas condiciones creadas por el río en las proximidades de la obra.

Las causas más frecuentes por las cuales un caño puede actuar como barrera infranqueable para los peces son (Bates *et al.*, 2003; figura 3):



FIGURA 3. Tres ejemplos de caños con problemas de paso para los peces: (a) caño con salida colgada (fotografía: Michael Love), (b) caño con profundidad insuficiente, (c) caño cegado por acumulación de sedimentos y restos leñosos.

- Profundidad de agua insuficiente en el interior del caño.
- Velocidad excesiva.
- Salto de agua exagerado a la salida del caño (salida colgada).
- Ausencia de estanques y zonas de descanso.
- Elevada turbulencia en el interior del caño.
- Acumulación de sedimentos y restos leñosos.

Los peces realizan desplazamientos más o menos largos en los ríos durante todo el año o parte de él por muy diversos motivos: reproducción, búsqueda de alimento, de refugio, o simplemente para evitar superpoblaciones o falta de recursos. Por ello, numerosos impactos negativos pueden aparecer cuando estos desplazamientos quedan limitados o impedidos. Obviamente, si el paso queda bloqueado permanentemente, el hábitat aguas arriba del obstáculo será inaccesible para las especies situadas aguas abajo del mismo. Sin embargo, existen muchos otros problemas derivados de esta situación, entre los cuales podemos mencionar los siguientes:

- **Pérdida de la diversidad genética** en el tramo aguas arriba del caño, ya que los peces pueden nadar río abajo pero no consiguen hacer el camino de retorno. Un caso extremo muy ilustrativo se refiere al arrastre completo de poblaciones residentes en la cabecera de un río como consecuencia de una gran avenida y que -posteriormente- no consiguen remontar a los lugares de origen cuando la situación se normaliza.
- **Reducción total o parcial del tiempo de migración** para especies anádromas y de la posibilidad de movimiento para las especies residentes.
- **Retraso en la migración y desgaste por sobreesfuerzo** al tener que sortear estos obstáculos. La freza puede producirse durante un corto periodo de tiempo, coincidiendo con determinados caudales y temperaturas del agua en el río, que son fundamentales para la supervivencia de los huevos y de los alevines. Los peces rezagados en su migración pueden llegar a las zonas de freza fuera de dichos periodos. Por otro lado, el sobreesfuerzo al que los migradores se ven sometidos para superar los obstáculos disminuye sus reservas de energía, necesarias para el éxito de su reproducción, y aumenta su predisposición a enfermedades por debilitamiento o cansancio.
- **Cambios en la genética poblacional** y en la genética de especies al lograr el paso sólo ciertas especies o individuos/estadios especialmente resistentes y con altas capacidades de nado.

3. SOLUCIONES: DISEÑO DE CAÑOS COMPATIBLES CON LA MIGRACIÓN DE LOS PECES

Obviamente, cuando sea posible, la mejor solución para evitar estos problemas consiste en eliminar el cruce de la carretera sobre el río, redefiniendo su trazado. En su defecto, la elección de un puente tradicional en lugar de un caño es otra buena opción. Si se opta por un caño de drenaje, conviene recordar que prevenir la aparición de los problemas resulta más fácil y económico que corregirlos. Más aún en este caso en el que, como veremos, los criterios que se deben seguir para evitar gran parte de dichos problemas son pocos y sencillos. Considerando que la mejor solución posible es aquella que altera menos las condiciones naturales iniciales del río, los principales métodos de diseño en orden decreciente de preferencia son (NOAA, 2001) (tabla 1):

- **Métodos de imitación fluvial.** Tratan de lograr el paso de los peces recreando en el interior del caño los procesos fluviales y las condiciones originales del tramo del río en el que se instala la obra (transporte y deposición de sedimentos, energía hidráulica, potencia disipada...). Con estos métodos no hay que estimar los caudales de paso ni la velocidad y profundidad del agua en el interior del caño, lo que supone un considerable ahorro de esfuerzo, tiempo y dinero, a la vez que elimina las incertidumbres inherentes a toda estimación y a la elección de las capacidades de nado de los peces. Además, la imitación fluvial cuenta con la gran ventaja de que, al favorecer la existencia en el caño de un régimen hidráulico similar al natural, se estará permitiendo el paso de todas las especies presentes en el río (no sólo el de las más atléticas).
- **Método hidráulico.** Consiste en comprobar que, durante el periodo de migración de la especie o clase de edad considerada, las distintas variables hidráulicas mantienen unos valores acordes con las capacidades natatorias de la especie objetivo. Este procedimiento suele resultar selectivo con respecto a las especies con capacidades de nado menores a las consideradas en los cálculos. Por otra parte, exige la obtención de los caudales de paso y de los distintos parámetros hidráulicos (velocidad / profundidad / potencia) asociados a los mismos así como un buen conocimiento de las características biológicas y ecológicas de la especie objetivo.
- **Empleo de deflectores, ralentizadores o estructuras típicas de escalas para peces.** Es una variante más compleja del método hidráulico y consiste en la introducción en el interior del caño de elementos que modifiquen las condiciones de flujo para conseguir el paso de los peces. Dado que la disposición de estructuras en el interior del caño es un aspecto muy delicado (modificación de la capacidad de desagüe de la obra, riesgo de colapso en avenidas...), ésta es una alternativa que sólo debe ser abordada por especialistas.

Método	Objetivo	Pendiente del cauce	Otras observaciones
Cauce Activo	Reproducir en el interior del caño los procesos naturales del río	≤ 3%	Caño nivelado a pendiente nula (0%) Máxima longitud del caño 30 m Mínimo ancho del lecho en el caño: 2 m
Simulación fluvial	Reproducir en el interior del caño los procesos naturales del río	≤ 6%	Pendiente del caño similar a la del cauce Mínimo ancho del lecho en el caño: 2 m
Diseño hidráulico	Adaptar las variables hidráulicas en el caño a las capacidades de nado y salto de la especie objetivo	< 0,5% (< 3,5% con deflectores)	Análisis simplificado: régimen uniforme Estudio riguroso: curvas de remanso

TABLA 1. Comparación de los métodos de diseño descritos.

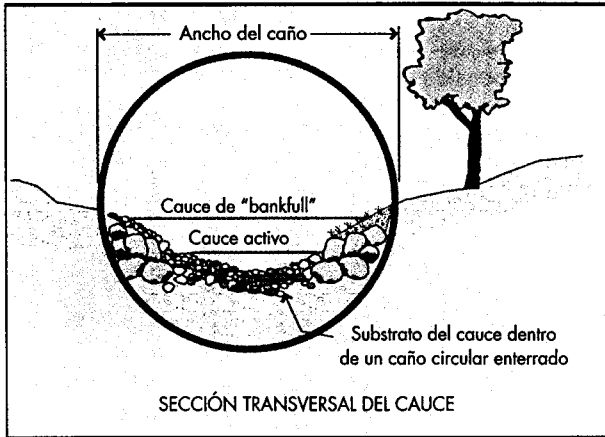


FIGURA 4. Relación existente entre el ancho del caño y el ancho del cauce.

3.1. MÉTODOS DE IMITACIÓN FLUVIAL

Puesto que los peces pueden nadar libremente por el cauce natural, la forma más segura de no limitar sus movimientos consiste en recrear las condiciones originales del río en el interior del propio caño. De acuerdo con este planteamiento, el valor mínimo del ancho interior del caño (figura 4) debe coincidir con el ancho medio del cauce².

La imitación fluvial exige caños de mayores dimensiones que los obtenidos por el método hidráulico. Sin embargo, el encarecimiento inicial que pueda suponer el uso de un caño de mayores dimensiones queda compensado por las ventajas ambientales que conlleva. Incluso y desde un principio, puede traducirse en un ahorro, al no necesitar de estudios adicionales para determinar los caudales de paso o las variables hidráulicas (velocidad, profundidad en el interior del caño) y biológicas (capacidades de nado y periodo de migración de la especie objetivo). Por otro lado, los costes de vigilancia ambiental, mantenimiento y conservación de la obra serán menores.

En la actualidad se emplean dos técnicas distintas de imitación fluvial conocidas como el *método del cauce activo* (*active channel design method*, NOAA, 2001) y el *método de simulación fluvial* (*stream simulation design method*, NOAA, 2001). Sus características más importantes se resumen a continuación.

3.1.1. MÉTODO DEL CAUCE ACTIVO

Se trata de una simplificación del método de simulación fluvial, que se describe en el apartado siguiente. Utiliza caños horizontales, por lo que también es conocido por método de la pendiente nula (*no-slope method*, Bates *et al.*, 2003). La imitación fluvial se consigue instalando un caño horizontal de sección amplia parcialmente enterrado en el lecho del cauce. De esta manera se favorece que el río cree un lecho estable en su interior al permitir los movimientos naturales de arrastre y deposición de sedimentos. Es una solución idónea para cauces pequeños. La formación de un lecho natural en pendiente dentro del caño provoca que la sección útil de entrada sea inferior a la de salida. Por ello se desaconseja este método en

² El ancho activo del cauce y el ancho definido por el nivel de 'bankfull' son dos formas frecuentes de definir el ancho medio del cauce. Una buena descripción de los mismos así como consejos prácticos para estimarlos en campo puede encontrarse en Bates *et al.* (2003).



FIGURA 5. Técnico marcando la línea de relleno en el interior de un caño diseñado por el método de la pendiente nula.

cauces con pendientes mayores del 3% y en caños de más de 30 m de longitud (NOAA, 2001).

Al dimensionar el caño hay que tener en cuenta las siguientes recomendaciones (NOAA, 2001):

- El ancho o diámetro del caño debe ser igual o superior a 1,5 veces el ancho activo del cauce.
- La pendiente longitudinal del caño ha de ser nula (0%).
- El fondo del caño debe enterrarse en el lecho del río, de tal forma que la sección de salida quede enterrada en al menos un 20% del diámetro o altura interior del caño y la sección de entrada en no más de un 40%.

Una vez instalado, el lecho interior del caño debe ser recreado artificialmente (figura 5). Al seleccionar el tamaño y la distribución del material que formará el lecho inicial del caño conviene elegir una granulometría similar a la del lecho del río en las inmediaciones de la obra.

3.1.2. MÉTODO DE SIMULACIÓN FLUVIAL

Cuando la situación requiera el uso de caños muy largos o la pendiente del cauce sea demasiado fuerte, el método simplificado anterior no es aplicable y hace falta recurrir a la simulación fluvial. El principio de funcionamiento es el mismo pero con la diferencia fundamental de que ahora el caño se instala siguiendo la pendiente del cauce original lo cual requiere un diseño mucho más cuidadoso (cauces rugosos en pendientes fuertes) y la necesidad de contar con información hidrológica y geomorfológica detallada.

Lo más habitual es el uso de caños de sección abierta³ (pues de esta forma se aprovecha el lecho del río), aunque también se pueden usar caños de sección cerrada soterrados parcialmente. Las recomendaciones para este tipo de instalaciones son:

- El ancho del lecho en el interior del caño (A_{lecho}) puede calcularse mediante las siguientes relaciones empíricas (Bates *et al.*, 2003):

$$1,3 \cdot A_c < A_{lecho} < 1,6 \cdot A_c$$

³ Este tipo de caños son muy parecidos a los puentes tradicionales con la salvedad de que presentan un terraplenado entre el firme del camino y el propio caño que forma parte de la integridad estructural de la obra (véase figura 1).

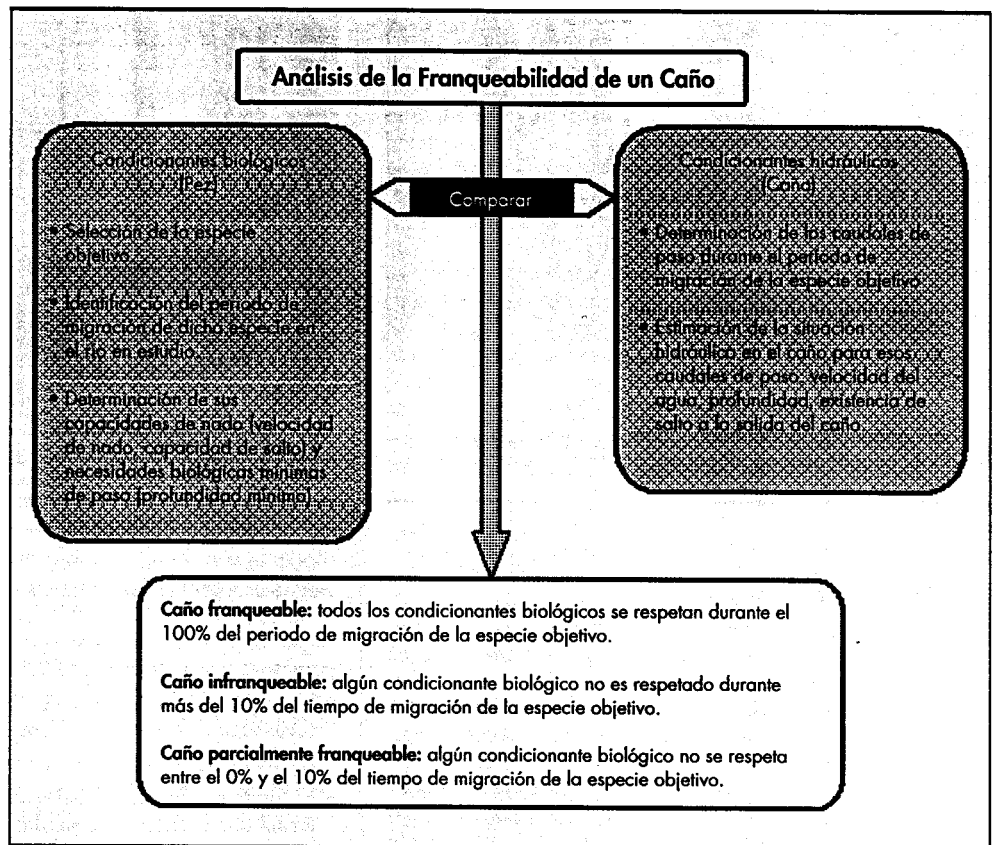


FIGURA 6. Proceso de análisis hidráulico de un caño de drenaje (análisis de franqueabilidad).

$$A_{lecho} \approx 1,2 \cdot A_c + 0,62 m$$

Donde A_c es el ancho medio del cauce definido según el nivel de 'bankfull'. Es importante resaltar que los autores no están hablando del diámetro o ancho interior del caño sino de la anchura del lecho en el interior del caño. El diámetro del caño (ϕ) debe ser al menos un 10% mayor que el mencionado ancho ($\phi \geq 1,1 \cdot A_{lecho}$).

- La pendiente longitudinal del caño ha de ser similar a la del cauce y no mayor del 6% (NOAA, 2001). Bates *et al.* (2003) también proporcionan una ecuación empírica para determinar el límite de aplicabilidad por pendiente del método de simulación fluvial:

$$R = \frac{I_l}{I_c}$$

Donde I_l es la pendiente del lecho del caño y I_c es la pendiente del cauce (ya sea ésta la pendiente existente antes de colocar el paso o, si se trata de la sustitución de un caño mal dimensionado, la pendiente aguas arriba de la estructura). Para valores de R mayores de 1,25 los autores recomiendan hacer uso del método hidráulico en lugar de la simulación fluvial.

- El fondo del caño debe enterrarse en el lecho del río entre un 30% y un 50% de la altura o diámetro interior del caño. En el caso de caños de sección abierta, las zapatas o la fundación deben quedar situadas por debajo de la zona de influencia de la erosión local evitando fenómenos de descalce (NOAA, 2001).

3.2. MÉTODO HIDRÁULICO

Este método consiste en comparar las condiciones hidráulicas existentes en el caño durante los caudales de paso considerados (periodo de migración), con las capacidades de nado y los requerimientos biológicos de la especie o especies objetivo (figura 6). El diseño hidráulico, por tanto, depende del caudal de paso y de la especie o especies consideradas, e implica conocimientos tanto hidráulicos e hidrológicos como biológicos.

Este sistema puede usarse tanto para diseñar nuevos caños franqueables, como para detectar y corregir problemas en caños ya existentes (diseño, seguimiento y control).

El método hidráulico suele aplicarse en cauces con pendientes bajas ($< 0,5\%$), si bien el empleo de deflectores o de escalas para peces puede aumentar este límite ($< 3,5\%$). Este tipo de estructuras (figura 7) suelen instalarse en el interior del caño para aumentar la rugosidad hidráulica del conjunto y solucionar los problemas debidos a una escasa profundidad o a una velocidad excesiva. La bibliografía especializada ofrece numerosas alternativas de diseño (Rajaratnam *et al.*, 1988, 1989, 1990 y 1991; Rajaratnam & Katopodis, 1990; Flosi *et al.*, 1998; Martínez de Azagra, 1999; BCMF, 2002; Bates *et al.*, 2003).

3.2.1. ANÁLISIS DE FRANQUEABILIDAD

En el método hidráulico, para una especie y clase de edad dados, los caudales máximos y mínimos de paso (Q_{max} y Q_{min} respectivamente) definen el rango de caudales de diseño para los que se debe realizar el análisis con vistas a garantizar la franqueabilidad de la obra (figura 8). Estos caudales se determinan local o regionalmente en base al conocimiento de cada especie y de sus patrones de migración. Fuera de ese rango de

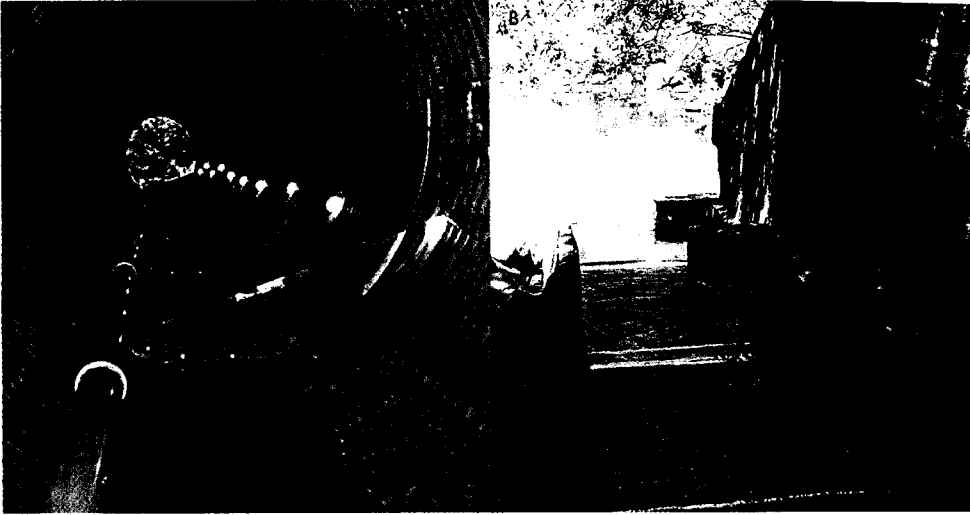


FIGURA 7. Los problemas de paso detectados en caños ya instalados pueden corregirse, en ocasiones, por medio de estructuras como (a) los deflectores o (b) las escalas para peces.

caudales el paso de los peces no es posible ni necesario. Así, por ejemplo, no tiene sentido intentar hacer un caño franqueable durante los periodos de grandes avenidas ya que durante los mismos los peces buscan refugio y evitan los desplazamientos. Algo similar puede ocurrir para los periodos de estiaje, sobre todo si de manera natural quedan tramos fluviales desconectados entre sí. Un criterio general que puede seguirse consiste en fijar dicho intervalo a partir de los caudales Q_{10} y Q_{90} (Q_{max} y Q_{min} respectivamente), esto es, los caudales que son superados el 10% o el 90% del tiempo durante el periodo de migración de la especie objetivo (Bates *et al.*, 2003).

Una vez fijado el intervalo de caudales (Q_{max} - Q_{min}), hay que determinar las variables hidráulicas en el interior del caño para dichos caudales extremos. Para ello se puede usar la ecuación de Manning suponiendo la existencia de régimen uniforme en el interior del caño (calado normal, y):

$$Q = v \cdot A = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R_h^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{I}$$

donde Q es el caudal ($m^3 \cdot s^{-1}$), v la velocidad del agua ($m \cdot s^{-1}$), $A = A(y)$ es la sección mojada (m^2 , que es función del calado normal, y), $R_h = R_h(y)$ es el radio hidráulico (m, que es función del calado normal, y), I la pendiente del lecho del caño (en tanto por uno), y n el coeficiente de rugosidad de Manning.

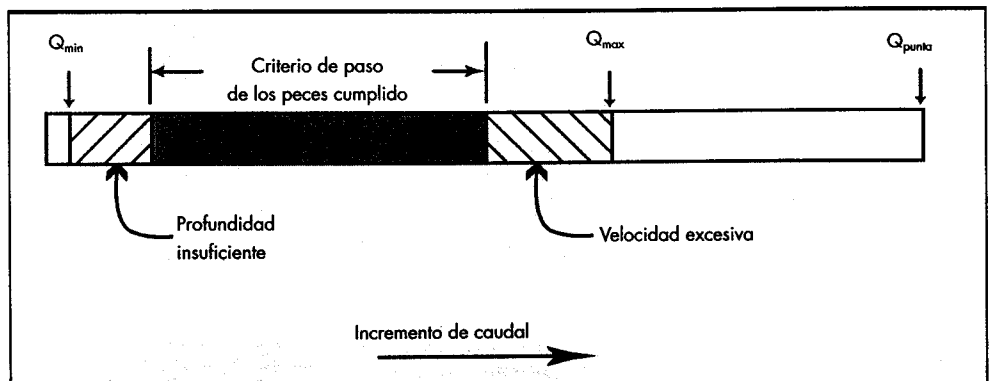
Con la ecuación de Manning y la geometría del caño se puede calcular la profundidad del agua en su interior (y) para un caudal dado (Q). Además, la máxima velocidad del agua (v_{max}) con la que el pez puede atravesar con éxito el caño se puede estimar mediante la siguiente ecuación:

$$v_{max} = v_{pez} \cdot \left(\frac{L}{t_{ex}} \right)$$

donde v_{pez} es la velocidad sostenida o punta del pez ($m \cdot s^{-1}$), L es la longitud del caño (m), y t_{ex} es el tiempo de extenuación (s) según la especie y el tipo de velocidad considerada.

A este respecto conviene recordar que los peces desarrollan tres tipos distintos de velocidades de nado según las circunstancias: la velocidad de crucero, la velocidad sostenida, y la velocidad punta o de sprint (García de Jalón *et al.*, 1993). Mientras que la primera la utilizan los peces en sus desplazamientos normales y pueden mantenerla durante horas sin cansancio, las otras dos velocidades requieren un gasto energético mayor y únicamente pueden ser desarrolladas durante ciertos periodos de tiempo, más largos para la velocidad sostenida que para la punta. Los peces emplean estas velocidades para salvar los tramos difíciles en sus desplazamientos (velocidad sostenida), y para superar los mayores obstáculos, conseguir el arranque en el salto, escapar de depredadores o cazar (velocidad punta). Para superar un obstáculo (v. g.: un

FIGURA 8. Para el intervalo de caudales a considerar (Q_{min} - Q_{max}) se determinan las condiciones básicas del flujo en el caño (calados, velocidades y salto), que se comparan con las exigencias del pez objetivo, para poder hacer un dictamen sobre la franqueabilidad de la obra.



Especie/Talla (cm)		Trucha común <i>Salmo trutta m. fario</i> 15 cm	Reo <i>Salmo trutta m. trutta</i> 35 cm	Salmón atlántico <i>Salmo salar</i> 60 cm
v _p (1) en función de la longitud del caño (m/s)	L < 20 m	1,25 (2)	1,60 (2)	2,50 (2)
	20 ≤ L ≤ 30 m	1,00 (2)	1,50 (2)	2,00 (2)
	L > 30 m	0,80 (2)	1,25 (2)	1,75 (2)
Calado mínimo (m)		0,10	0,15	0,30
Salto máximo a la salida (m) (4)		0,20	0,30	0,50

- (1) Velocidad punta o sostenida del pez. La velocidad media del agua en el caño debe ser menor que los valores indicados.
 (2) Valores de la velocidad punta para temperaturas del agua de 5° C.
 (3) Valores de la velocidad sostenida para temperaturas del agua de 5° C.
 (4) Suponiendo la existencia de un estanque a la salida del caño de profundidad residual no inferior a 1,5 veces la altura de la caída.

TABLA 2. Criterios de paso para algunas especies de salmónidos.

caño) los peces hacen uso de su velocidad sostenida y, cuando la situación se complica, también de la velocidad punta.

Así, conocida la profundidad mínima (y_{min}) y la velocidad máxima (v_{max}) necesarias para el paso de la especie considerada, las comprobaciones básicas que han de hacerse son dos:

$$y \geq y_{min}$$

$$v \leq v_{max}$$

En caso de salida colgada (figura 3a), habrá que comprobar -además- que la caída de agua no resulte superior a la capacidad de salto de la especie o clase de edad objetivo. Para ello, no sólo se debe analizar la altura del salto en sí, sino también la existencia de una poza suficientemente profunda aguas abajo del caño que permita al pez tomar el impulso necesario para el salto.

La tabla 2 muestra algunos de estos criterios de diseño para tres de nuestras especies de salmónidos.

Si se pretende un análisis hidráulico más preciso, se pueden considerar las curvas de remanso (del régimen gradualmente variado): en los casos en los que el nivel en el río a la salida del caño sea mayor que el calado normal en la sección de salida (calculado según la ecuación de Manning) pueden existir unas condiciones de remanso que pausen el flujo aumentando la profundidad y disminuyendo la velocidad del agua. En cualquier caso, de ser aplicables, es obvio que la situación de flujo remansado supone una mejora de las condiciones de paso, por lo que al no considerarlas estamos del lado de la seguridad ya que hacemos un análisis menos exacto pero más conservador del problema. De esta forma, si haciendo los cálculos más sencillos y rápidos para régimen uniforme las condiciones son favorables, no hará falta hacer un análisis de la posible situación de flujo remansado.

Una herramienta muy útil para el diseño hidráulico de los caños es el programa informático FishXing⁴ (Love *et al.*, 1999). Una vez definidas las características del caño y fijado el pez objetivo, (figura 9a), este programa informático localiza e identifica los tipos de barreras potenciales para el rango de caudales de paso a analizar. El modelo no sólo realiza los cálculos para flujo uniforme sino que también permite calcular los perfiles hidráulicos (figura 9b) y simular las curvas de re-

manso en el interior del caño. FishXing ha sido desarrollado, calibrado y validado con numerosos casos prácticos en Estados Unidos. Resulta muy útil para evaluar e identificar pasos que impiden el remonte de los peces, permitiendo la corrección de numerosas barreras (Llanos *et al.*, 2004). El programa cuenta con una extensa base de datos biológica, que incluye las capacidades de nado y de salto de muchas especies europeas y americanas, lo que aumenta su interés práctico para el proyectista o evaluador.

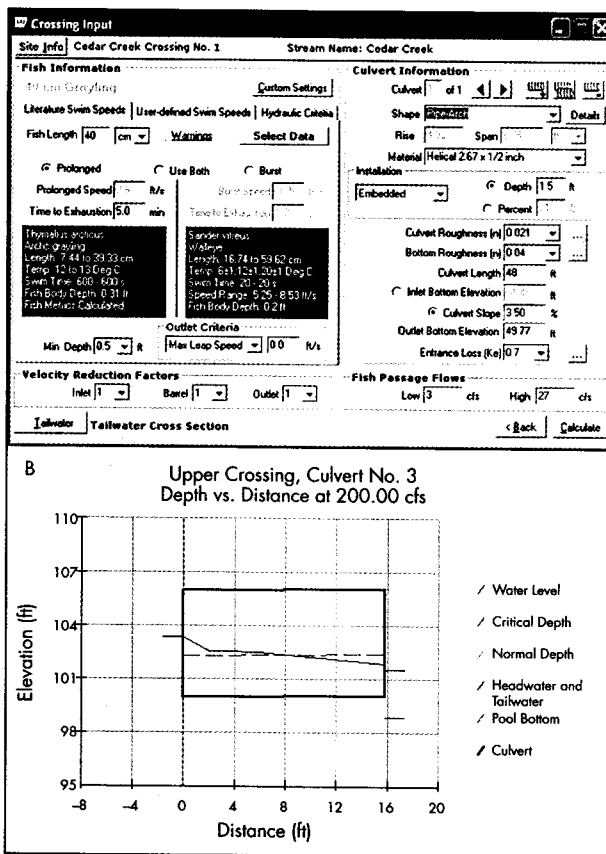


FIGURA 9. Imágenes del programa FishXing 3.0 mostrando (a) la pantalla de entrada de datos y (b) el perfil hidráulico de un caño.

4 La versión 3.0 saldrá en breve y es muy posible que se saque también una versión al castellano. La versión 2.2 del programa puede conseguirse gratuitamente en www.stream.fs.fed.us/fishxing/.

4. CONCLUSIONES

Puentes y viaductos constituyen las alternativas más ventajosas para el tránsito de la fauna fluvial (y terrestre), por ser estructuras muy holgadas y permeables. En ríos y carreteras importantes se suelen adoptar estas dos soluciones de forma generalizada. El problema se presenta en cauces menores (o infravalorados) y en carreteras secundarias, cuando la rasante se proyecta a escasos metros sobre el nivel del álveo. Un pequeño margen de cotas, pero también el desconocimiento de la problemática que comentamos, puede conducir a una solución desacertada desde el punto de vista ambiental. El uso de varios caños en paralelo de poco diámetro (en sustitución de un único caño de diámetro similar al cauce), pendientes longitudinales elevadas (supracríticas), o la inclusión de un fuerte desnivel en la salida para asegurar el buen desagüe de caudales son decisiones perniciosas para la vida fluvial.

La vigente instrucción española sobre drenaje superficial en carreteras (Orden de 14 de Mayo de 1990) establece como caudal de diseño mínimo para las obras de drenaje transversal el caudal punta con periodo de recurrencia de 100 años. Esta imposición legal tendría que abarcar, siempre y con creces, las humildes exigencias ecológicas que plantean los métodos de imitación fluvial (cuyos anchos no van mucho más allá de la anchura media del cauce durante las avenidas ordinarias). Sin embargo, no siempre ocurre así por las razones esbozadas en el párrafo anterior. Las secciones mojadas de máxima eficiencia hidráulica (es decir: circulares) suelen estar reñidas con la naturaleza, como también lo están las rugosidades bajas, las pendientes elevadas o las rebajas y modificados de última hora.

El riesgo de que un caño de drenaje genere una barrera para el paso de los peces es elevado, si no se adoptan las medidas oportunas. La división y el confinamiento artificial de las poblaciones piscícolas afectadas suponen impactos ambientales muy negativos, que pueden llegar a ser irreversibles si alguna de las poblaciones desaparece. Sin embargo y con la incorporación de unos sencillos criterios ecológicos (descritos en este artículo y que no encarecen la obra) se pueden evitar estos problemas de raíz.

Deben ser las diferentes Administraciones Públicas (Dirección General de Carreteras, CEDEX, Confederaciones Hidrográficas, Consejerías, Diputaciones, etc.) quienes promuevan estas medidas protectoras a través de normas legales y/o marcas de calidad.

Las soluciones propuestas están en consonancia con la vigente instrucción 5.2 - IC sobre drenaje superficial. No implican una mayor exigencia. Tan sólo apuestan por unas obras civiles más naturales y menos constreñidas, lo que a la larga redundará en una necesidad de vigilancia ambiental menor. Se trata, en definitiva, de ampliar horizontes añadiendo una nueva componente ambiental en los proyectos, justa y fácil de satisfacer: asegurar el libre tránsito de los peces durante su periodo de migración natural.

Mientras tanto, nosotros podremos cruzar sus dominios por arriba con el debido respeto y a gran velocidad. ¡Es el progreso!

5. BIBLIOGRAFÍA

Bates, K. *et al.* 2003. Fish Passage at Road Culverts. A design manual for fish passage at road crossings. Washington Department of Fish and Wildlife, Habitat and Lands Program, Environmental Engineering Division.
British Columbia Ministry of Forests (BCMF). 2002. *Fish-stream crossing guidebook*. For. Prac. Br., Min. For., Victoria, B.C. Forest Practices Code of British Columbia guidebook.
Conroy, S.C. 1997. *Habitat lostland found*. Washington Trout Report. Vol. 7:1.

Flosi G., Downie S., Hopelain J., Bird M., Coey R. y Collins B. 1998 *California Salmonid Stream Habitat Restoration Manual*. 3rd edition. California Department of Fish and Game.
García de Jalón Lastra, D.; Mayo Rustarazo, M.; Hervella Rodríguez, F.; Barceló Culebras, E. y Fernández Couto, T. 1993. *Principios y técnicas de gestión de la pesca en aguas continentales*. Mundiprensa. Madrid.

García Molinos, J. 2003. *Propuesta de una metodología para el análisis de los obstáculos a la migración de los peces en los caños de drenaje de carreteras*. Proyecto Fin de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Campus de Palencia, Universidad de Valladolid. Inédito.

García Molinos J., Martínez de Azagra A. y Llanos A. 2004a. *Fish passage at road culverts. The Burgos rivers case (Spain)*. García de Jalón D. y Vizcaíno Martínez P. (Ed.). Fifth International Symposium on Ecohydraulics, Aquatic Habitats: Analysis & Restoration. September 12-17, 2004, Madrid (II): 1031-1035.

García Molinos J. y Martínez de Azagra A. 2004b. *Diseño y construcción de pequeñas obras de paso viario compatibles con la migración de peces*. <<http://www.oasificacion.com>>

General Accounting Office. 2001. *Restoring Fish Passage Through Culverts on Forest Service and BLM Lands in Oregon and Washington Could Take Decades*. GAO-02-136. Washington D.C. USA

Jackson, S. *Ecological Considerations in the Design of River and Stream Crossings*. En preparación. USDA Forest Service. San Dimas Tech. & Development Center. San Dimas, California.

Llanos A., Love M., Furniss M., Firor S., Moynan K., Guntle J. y García Molinos J. 2004. *Modelling fish capabilities and culvert hydraulics for the assessment and design of stream crossings*. García de Jalón D. y Vizcaíno Martínez P. (Ed.). Fifth International Symposium on Ecohydraulics, Aquatic Habitats: Analysis & Restoration. September 12-17, 2004, Madrid (I): 482-488.

Love, M *et al.* 1999. *FishXing v 2.2* [aplicación informática]. FishXing Project, Six River National Forest Watershed Interactions Team. <<http://www.stream.fs.fed.us/fishxing/>>

Martínez de Azagra Paredes, A. 1999. *Escaleras para peces*. Publicaciones ETSIIAA, nº 26. Palencia. También en: <<http://www.oasificacion.com>>

MOPU. 1990. Instrucción 5.2. - IC. Drenaje superficial. Textos de la Dirección General de Carreteras, nº 37. MOPU. Madrid
National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 2001. *Guidelines for salmonid passage at stream crossings*. National Marine Fisheries, Santa Rosa, California.

Orden de 14 de mayo de 1990, por la que se aprueba la instrucción de carreteras 5.2-IC "Drenaje superficial" (BOE núm. 123, de 23 de mayo de 1990).

Rajaratnam, N.; Katopodis, C. y Lodewyk, S. 1988. "Hydraulics of offset baffle culvert fishways". *Canadian Journal of Civil Engineering*. Volume 15, Number 6: 1043-1051.

Rajaratnam, N.; Katopodis, C. y McQuitty, N. 1989. "Hydraulics of culvert fishways II: slotted-weir culvert fishways". *Canadian Journal of Civil Engineering*. Volume 16, Number 3: 375-383.

Rajaratnam, N. y Katopodis, C. 1990. "Hydraulics of culvert fishways III: weir baffle culvert fishways". *Canadian Journal of Civil Engineering*. Volume 17, Number 4: 558-568.

Rajaratnam, N.; Katopodis, C. y Fairbairn, M. A. 1990. "Hydraulics of culvert fishways V: Alberta fish weirs and baffles". *Canadian Journal of Civil Engineering*. Volume 17, Number 6: 1015-1021.

Rajaratnam, N.; Katopodis, C. y Lodewyk, S. 1991. "Hydraulics of culvert fishways IV: spoiler baffle culvert fishways". *Canadian Journal of Civil Engineering*. Volume 18, Number 1: 76-82.