

EVALUACIÓN DE LA MORTALIDAD DE PECES TRAS SU PASO POR TURBINAS HIDROELÉCTRICAS EN RÍOS DEL NORTE DE ESPAÑA

FERNANDO BALLESTEROS¹ Y VÍCTOR M. VÁZQUEZ²

RESUMEN

El descenso hacia el mar de los peces migradores, en particular de los juveniles de salmón atlántico (*Salmo salar*), se encuentra dificultado por la presencia de centrales hidroeléctricas en la mayor parte de los ríos del norte de España. La necesidad de atravesar las turbinas de las centrales hidroeléctricas puede ocasionar daños de diverso tipo a los peces. Para evaluar esta incidencia se han realizado pruebas en las turbinas de cuatro centrales localizadas en la cuenca media y baja del río Nalón. Se han introducido truchas arco-iris (*Oncorhynchus mykiss*) del mismo rango de tamaños que los esguines de salmón de los ríos del norte de España (100-240 mm) y se han recogido mediante la instalación de redes acopladas al marco de la salida o mediante la colocación a cada pez de una marca con un sistema de flotación que permite su captura aguas abajo. Los resultados obtenidos indican que la mortalidad varía según las características de cada central desde 2,93% \pm 6,65% en Valduno, con una altura de salto muy pequeña y turbina Kaplan de 122 rpm a plena carga, hasta 18,62% \pm 8,56% en Puerto, con una altura media de salto y turbina semi-Kaplan de 350 rpm. Debe tenerse en cuenta el efecto aditivo que se produce cuando los peces atraviesan sucesivamente todas las centrales de un río. En las centrales de derivación las soluciones son tan sencillas como impedir la entrada de los peces en el canal de toma y habilitar un régimen de caudales ecológicos para facilitar su paso por el propio río. En las centrales fluyentes la solución es más complicada, aunque pueden construirse barreras y dispositivos de paso a través de la presa.

Palabras clave: salmón, *Salmo salar*, esguín, trucha arco-iris, *Oncorhynchus mykiss*, mortalidad, turbinas.

SUMMARY

Downstream migration of salmon smolts and other migratory fishes is negatively affected by the presence of hydroelectric power stations in many rivers of the north of Spain. There are different risks associated with fish passage through turbines. To evaluate this problem, some experiences were carried out in four power stations of the lower and medium range of Nalon river introducing in the turbines rainbow trouts of similar length than north spanish salmon smolts (100-240 mm) and recapturing them with a great net or with a specially designed balloon tag, individually attached, wich inflates after turbine passage and permits the recapture of the fish. Results show that turbine mortality is

¹ Sistemas Naturales, S.L. c/ Santa Susana, 15, 3.º C. 33007-Oviedo, Asturias. E-mail: ferb@inicia.es.

² Consejería de Medio Ambiente, Principado de Asturias. Edificio Admtvo. Servicios Múltiples, c/ Coronel Aranda, s/n. 33005-Oviedo, Asturias. E-mail: victorvf@princast.es.

Recibido: 15/02/01.

Aceptado: 15/11/01.

low in general but varies with a variety of factors such as design of turbine or characteristics of the power station. Mortality in our experiences varies between $2,93\% \pm 6,65\%$ in Valduno, with a Kaplan turbine, and $18,62\% \pm 8,56\%$ in Puerto, with a Semi-Kaplan turbine. Its important to consider the cumulative effects of fish passage through different power stations in the downstream migration route. Mitigative measures as exclusion devices or bypass structures are expensive and difficult to install.

Key words: salmon, *Salmo salar*, smolt, rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, mortality, turbines.

INTRODUCCIÓN

El salmón atlántico (*Salmo salar*) es una especie migradora anadroma, es decir con reproducción fluvial y desarrollo en el mar. Está presente en los principales ríos de la zona norte de la Península Ibérica entre el Miño y el Bidasoa (DOADRIO *et al.* 1991). En general, la tendencia de las poblaciones ibéricas es regresiva, y ello ha motivado la inclusión de la especie en el Libro Rojo de los Vertebrados de España dentro de la categoría de Vulnerable (BLANCO & GONZÁLEZ 1992), aunque sigue siendo objeto de aprovechamiento en pesca deportiva.

El esguinado es la fase en la que los salmones juveniles nacidos en el río se preparan para su migración hacia el mar. Los salmones ibéricos desarrollan una estrategia de bimodalidad en el crecimiento durante la primera fase de vida fluvial. En consecuencia, en los ríos de la Península, la mayor parte de los juveniles alcanzan la talla de esguinado y migración al mar cuando tienen un año de edad, aunque algunos requieren un año más de residencia en el río antes de iniciar la migración (NICIEZA *et al.* 1991; NICIEZA & BRAÑA 1995; UTRILLA & LOBÓN-CERVIÁ 1999). El esguinado solo se produce cuando los salmones alcanzan un tamaño ventajoso para la supervivencia en las primeras fases del crecimiento en el mar. Así, aunque la longitud media alcanzada al final del primer período de crecimiento presenta grandes variaciones interanuales, la longitud media de esguinado es un parámetro relativamente constante dentro de cada población (NICIEZA *et al.* 1995).

La mortalidad sufrida por los juveniles de salmón y otros peces migratorios al atravesar las turbinas de las centrales hidroeléctricas durante su fase de migración hacia el mar es un problema bien

conocido en Europa y Estados Unidos (CRAMER & OLIGHER 1964; EICHER *et al.* 1987; DAVIES 1988; CADA 1990; ELVIRA *et al.* 1998a; ELVIRA *et al.* 1998b), aunque no ha sido estudiado hasta el momento en los ríos españoles. En el norte de la Península Ibérica, además del salmón, el problema afecta a otras especies anadromas como la lamprea marina (*Petromyzon marinus*), el sábalo (*Alosa alosa*) o algunas poblaciones de trucha migradora o reo (*Salmo trutta*), y a especies catadromas como la anguila (*Anguilla anguilla*).

Las turbinas hidroeléctricas son máquinas que transforman la energía cinética y potencial del agua en energía mecánica. Las turbinas de acción, como la Pelton, poseen un rodete con palas que aprovecha la velocidad del flujo de agua, suministrado y regulado por uno o varios inyectorres, para el movimiento de giro. Las turbinas de reacción, como la Francis o la Kaplan, aprovechan la diferencia de presión además de la propia velocidad del flujo de agua. Estas turbinas poseen un distribuidor, que dirige el flujo de agua hacia la rueda de la turbina, forzando la velocidad y la dirección para evitar las pérdidas de energía, y un tubo de aspiración, que recoge el agua a la salida de la rueda y permite recuperar en forma de energía de presión la energía cinética del agua.

Los cambios de presión y velocidad o el choque directo con elementos de las turbinas son las causas de mortalidad y lesiones en los peces. La presión sufre un ligero incremento a lo largo del conducto de entrada en la turbina, pero desciende de forma considerable a partir de la entrada en el distribuidor, alcanzándose presiones inferiores a la atmosférica a la salida de la rueda y en el tránsito por el tubo de aspiración. Estos cambios bruscos de presión afectan a los peces de forma directa o por

la aparición de efectos secundarios como la cavitación. En las turbinas a reacción la velocidad del agua no suele alcanzar valores muy elevados, pero los cambios que se producen son muy rápidos y pueden provocar daños en los peces por el efecto de cizalladura. Finalmente, el choque directo con las palas del distribuidor o de la rueda de la turbina puede ocasionar diversos traumatismos.

Las experiencias desarrolladas en otros países han mostrado que la mortalidad de peces a través de las turbinas puede ser muy variable, dependiendo de las condiciones del cauce, de las características de la turbina y de la estructura, talla y características biológicas de los peces implicados (OLSON & KACZINSKI 1980; DARTIGUELONGUE & LARINIER 1987; TRAVADE *et al.* 1987; DAVIES 1988; LARINIER & DARTIGUELONGUE 1989; CADA 1990; HEISEY *et al.* 1992; HEISEY *et al.* 1996; MATHUR *et al.* 1996). En el presente artículo se recogen los resultados de diversas experiencias realizadas en centrales hidroeléctricas situadas en la cuenca media del río Nalón (Asturias) para evaluar la supervivencia de los esguines de salmón tras su paso por las turbinas. Este estudio se enmarca dentro de un plan general de recuperación del salmón atlántico en la cuenca del río Nalón desarrollado por el Principado de Asturias.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

Se han realizado pruebas de valoración de supervivencia de peces en cuatro centrales hidroeléctricas situadas en los ríos Nalón y Nora, en la cuenca del río Nalón (Asturias). La construcción de grandes presas y los efectos de la contaminación derivada de la minería del carbón son las principales causas de la desaparición del salmón en este río hace varias décadas y de la alteración general de sus comunidades piscícolas. En la actualidad, la Administración del Principado de Asturias está desarrollando actuaciones para la recuperación de la especie, entre las que destacan la instalación de dispositivos que permitan la migración ascendente y descendente evitando los obstáculos existentes y el estudio de la mortalidad durante el descenso de los esguines.

Especie y talla de los ejemplares experimentales

El principio de los métodos de estudio de la supervivencia de salmones tras su paso por las turbinas de una central hidroeléctrica consiste en hacer pasar a través de la turbina un número apropiado de peces y recapturarlos después del paso. Teniendo en cuenta la dificultad de disponer de un número elevado de esguines de salmón para las experiencias y dado que no parece existir un comportamiento diferente para las diversas especies de salmónidos en cuanto a la mortalidad tras su paso por un mismo tipo de turbina (LARINIER & DARTIGUELONGUE 1989), se han utilizado ejemplares de trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) de un rango de tamaños equivalente al de los esguines de salmón.

En las poblaciones ibéricas de salmón atlántico la longitud media de los esguines varía habitualmente entre 130 y 180 mm, aunque es posible encontrar ejemplares entre 100 y 240 mm (NICIEZA *et al.* 1991; UTRILLA & LOBÓN-CERVIÁ 1999). Los estudios realizados en el río Narcea indican que la talla óptima de esguinaje en la población de salmón de este río es de 155-175 mm, existiendo una longitud crítica mínima de 130 mm para el esguinaje (NICIEZA *et al.* 1995). Se ha medido la longitud furcal en una muestra de las truchas empleadas en las experiencias y se ha obtenido un rango de tallas entre 100 y 240 mm, con una talla media de 192,2 mm ($n = 1.000$; $S = 23,4$).

Métodos de introducción y recuperación de los peces

Las truchas se han inyectado en las rejillas de las tomas de las turbinas o en las aberturas de mantenimiento existentes tras las rejillas en alguna de las centrales. Para ello se han utilizado instalaciones de tubos rígidos acodados con un flujo de agua circulante en su interior diseñados en función de las características de cada central.

La validez de las experiencias depende básicamente de la eficacia del sistema de recaptura. En la central de Priañes se han empleado dos métodos diferentes para contrastar su utilidad.

El método de filtración total consiste en la recogida de todos los peces que han pasado a través de la turbina mediante la fijación de una red sobre la zona de salida de agua. Este método es muy fiable ya que se basa en la recuperación de la totalidad de los ejemplares soltados. La dificultad de la técnica reside en la fijación de la red sobre la salida de agua de la turbina (OLSON & KACZYNSKI 1980; LARINIER & DARTIGUELONGUE 1989). La red empleada en el presente estudio tiene unas dimensiones de 5,7 x 3,5 m de apertura en la boca y 25 m de longitud. La luz de malla es variable, con diámetros de 22 mm en los primeros tramos de la red y 14 mm en la parte final. En la última parte de la red va acoplada una nasa fijada a una estructura flotante que permite la recogida de los peces. La boca de la red está fijada a un marco metálico que se acopla a la estructura de hormigón de la salida de la turbina mediante unos raíles unidos con anclajes mecánicos de seguridad a las paredes de la presa.

El otro método de recuperación empleado es el marcaje de los peces con un dispositivo flotante que permite su localización tras pasar la turbina. Presenta la ventaja de evitar el empleo de infraestructura pesada en el manejo de redes. En el presente estudio se ha empleado un dispositivo de autoflotación consistente en un globo fijado al pez en cuyo interior se produce una reacción química generadora de gas tras inyectarle 2 ml de agua en el momento de ser introducido en la turbina, de forma que se produce su autohinchado una vez atravesada la turbina y se permite la recuperación del pez desde embarcaciones (HEISEY *et al.* 1992). El retardo en el inicio del hinchado, necesario para que los globos atraviesen las tur-

binas sin sufrir daños, se logra preservando la sustancia reactiva en el interior de una cápsula de gelatina dura que se disuelve al cabo de unos minutos de contacto con el agua.

Desarrollo de las pruebas y análisis de los datos

Teniendo en cuenta el modelo de turbina, la velocidad de rotación, el caudal máximo y el diámetro, existen seis tipos diferentes de turbina en las cuatro centrales hidroeléctricas estudiadas (tabla 1). Se ha realizado una prueba con el método de marcaje de peces en cada tipo de turbina en condiciones habituales de funcionamiento, aunque en las turbinas Kaplan con posibilidad de regulación de caudal de las centrales de Priañes y Valduno se han realizado pruebas a media carga y a plena carga. En la central de Priañes se han realizado, además, pruebas con el método de filtración total en ambas turbinas a media carga y a plena carga. En total se han efectuado doce pruebas introduciendo un lote de 100 peces vivos en cada prueba.

Por otra parte, puede existir cierta mortalidad asociada al propio desarrollo de las operaciones de captura, recogida y mantenimiento en observación, por lo que se han efectuado ocho pruebas adicionales utilizando ocho lotes control de 100 truchas vivas, que se han liberado inmediatamente después de la salida del agua de las turbinas. Estas truchas se han sometido a las mismas manipulaciones que los lotes experimentales de forma que se ha podido estimar la correspondiente tasa de mortalidad asociada a la metodología, que se emplea para corregir la tasa de mortalidad bruta.

TABLA 1
CARACTERÍSTICAS DEL SALTO Y LAS TURBINAS DE LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS EN LAS QUE SE HAN REALIZADO LAS PRUEBAS

Central	Altura de salto	N.º de turbinas	Tipo de turbinas	Velocidad de rotación	Caudal máximo	Potencia nominal	Diámetro	N.º de palas
Priañes	17,7-20 m	1	Kaplan	300 rpm	60 m ³ /s	10 MW	3,1 m	5
		2	Kaplan	200 rpm	25 m ³ /s	4 MW	1,9 m	5
Valduno I	3,8 m	2	Kaplan	122 rpm	50 m ³ /s	2,5 MW	3,16 m	4
		1	Semi-Kaplan	275 rpm	15 m ³ /s	1 MW	1,7 m	4
Puerto	8 m	1	Semi-Kaplan	332 rpm	8 m ³ /s	0,5 MW	1,6 m	4
		1	Semi-Kaplan	340 rpm	12 m ³ /s	0,75 MW	2 m	4

Las truchas recuperadas vivas se han mantenido después de la prueba durante 48 horas en tanques especialmente acondicionados, en los que el agua se mantiene a una temperatura de 12-16 °C con una concentración de oxígeno disuelto ≥ 9 mg/l, para valorar la posible mortalidad asociada a lesiones no detectables. Los cálculos se han realizado con los valores del número de truchas muertas después del período de observación.

La mortalidad de las truchas tras su paso por las turbinas se ha estimado mediante métodos de captura y recaptura (BURNHAM *et al.* 1987; POLLOCK *et al.* 1995), siguiendo la terminología empleada por MATHUR *et al.* (1992). Se ha seleccionado un modelo general con cuatro parámetros: probabilidad de recaptura del lote experimental (P_e), probabilidad de recaptura del lote control (P_c), mortalidad del lote experimental (M_e) y mortalidad del lote control (M_c).

Los cuatro parámetros del modelo se estiman a partir del número de truchas introducidas en el lote experimental (N_{te}), el número de truchas recuperadas muertas del lote experimental (N_{me}), el número de truchas recuperadas vivas del lote experimental (N_{ve}), el número de truchas introducidas en el lote control (N_{tc}), el número de truchas recuperadas muertas del lote control (N_{mc}) y el número de truchas recuperadas vivas del lote control (N_{vc}).

$$P_e = \frac{N_{me} + N_{ve}}{N_{te}} \quad P_c = \frac{N_{mc} + N_{vc}}{N_{tc}}$$

$$M_e = \frac{N_{me}}{N_{te} P_e} \quad M_c = \frac{N_{mc}}{N_{tc} P_c}$$

La tasa de mortalidad corregida y su correspondiente error típico se han estimado mediante las expresiones siguientes:

$$\hat{M} = \frac{M_e - M_c}{1 - M_c}$$

$$ET(\hat{M}) = \frac{1}{S_c} \sqrt{\frac{M_e}{N_{te}} \frac{S_e}{N_{te}} + (1 - M_c)^2 \frac{M_c}{N_{tc}} \frac{S_c}{N_{tc}}}$$

siendo $S_e = 1 - M_e$ y $S_c = 1 - M_c$. A partir del error típico se ha obtenido el intervalo de confianza de la estimación de mortalidad para un nivel de significación $p < 0,05$. Las diferencias entre la supervivencia estimada en cada una de las pruebas se han evaluado mediante el test de igualdad entre porcentajes (SOKAL & ROHLF 1969).

Las truchas muertas y los restos recogidos a la salida de la turbina se han analizado para evaluar el origen y las características de las lesiones. Se han diferenciado las lesiones de origen mecánico (cortes, abrasiones, contusiones, fracturas, hemorragias y perforaciones), las provocadas por gradiente de velocidad (opérculos y arcos branquiales lesionados, cabeza separada del cuerpo) y las debidas a variaciones de presión (exoftalmias, zonas macedradas, lesiones en vesícula natatoria sin impacto aparente).

RESULTADOS

En las turbinas de la central de Priañes se han contrastado los dos métodos de recuperación de truchas (tabla 2). En las pruebas de filtración ha sido difícil mantener un ajuste perfecto entre el marco de la red y la boca de salida al aumentar el caudal circulante, lo que reduce la tasa de recaptura de truchas y la precisión de los valores de mortalidad. Este problema ha sido especialmente importante en la turbina de 300 rpm y 3,1 m de diámetro, por lo que los valores obtenidos en las pruebas con esta turbina no se consideran representativos de la mortalidad real. En la turbina de 200 rpm y 1,9 m de diámetro, en la que se ha logrado un buen ajuste, los valores de mortalidad corregida no difieren significativamente para ambos métodos de recuperación ($t = 1,0958$; $p > 0,05$).

Las tasas de recuperación de truchas con el método de marcaje han variado entre 57 y 98%. La proporción media con este método ha sido 74,38% para todos los lotes experimentales y 84,5% para todos los lotes control, siendo estadísticamente significativas las diferencias entre ambos valores ($t = 5,1873$; $p < 0,001$).

Los mayores valores de mortalidad se han obtenido en la central de Puerto, con turbinas semi-

TABLA 2
COMPARACIÓN DE LOS PORCENTAJES DE MORTALIDAD ESTIMADOS CON AMBOS MÉTODOS DE RECUPERACIÓN EN LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE PRIAÑES

Velocidad rotación (rpm)	Caudal salida (m ³ /s)	Método de filtración total con red						Método de marcaje con globos flotadores					
		Pe	Pc	Me	Mc	M	IC	Pe	Pc	Me	Mc	M	IC
200	12,5	99	99	11,11	6,06	5,38	0-13,48	78	78	21,79	14,1	8,95	0-20,82
200	25	37	99	18,92	6,06	13,69	4,46-22,92	-	-	-	-	-	-
300	15	17	71	63,99	7,55	61,05	52,55-69,55	-	-	-	-	-	-
300	30	25	71	32,43	7,55	26,91	18,15-35,67	76	96	5,3	0	5,3	2,2-8,4
300	60	-	-	-	-	-	-	69	70	28,99	22,86	7,95	0-23,09

Pe: Probabilidad de recaptura del lote experimental; Pc: Probabilidad de recaptura del lote control; Me: Mortalidad bruta del lote experimental; Mc: Mortalidad bruta del lote control; M: Mortalidad corregida; IC: Intervalo de confianza de la mortalidad corregida para un nivel de significación $p < 0,05$ con el límite inferior truncado a 0. Los guiones indican que no se ha realizado prueba en esas condiciones.

Kaplan y un salto de 8 m de altura. Los menores valores se han obtenido en la central de Valduno, con turbinas Kaplan y el menor salto y la menor velocidad de rotación de todas las turbinas estudiadas (tabla 3). No se observan diferencias significativas entre los valores de mortalidad obtenidos con diferentes condiciones de funcionamiento en las centrales de Priañes ($t = 0,9389$; $p > 0,05$), Valduno ($t = 0,1007$; $p > 0,05$) y Puerto ($t = 0,3705$; $p > 0,05$). Comparando los valores de mortalidad estimados en diferentes centrales se obtienen diferencias significativas entre las turbinas semi-Kaplan 275 rpm de Puerto y

semi-Kaplan 340 rpm de Olloniego con un caudal de 11 m³/s ($t = 2,0939$; $p < 0,05$) y entre las turbinas Kaplan 200 rpm de Priañes y Kaplan 122 rpm de Valduno con caudales medios (12,5 y 25 m³/s respectivamente) ($t = 1,970$; $p < 0,05$).

Las lesiones producidas en las truchas muertas al atravesar la turbina se han agrupado en varios tipos (tabla 4). Las lesiones más frecuentes son los cortes o desgarros a nivel medio del cuerpo, que en muchos casos llegan a seccionar totalmente a la trucha. Este tipo de lesiones está provocado por choques mecánicos con las palas de la turbina o

TABLA 3
RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MÉTODO DE MARCAJE DE PECES EN LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS ESTUDIADAS

Central	Altura del salto (m)	Tipo de turbina	Velocidad rotación (rpm)	Caudal salida (m ³ /s)	Pe	Pc	Me	Mc	M	IC
Priañes (Nora)	17,7 - 20	Kaplan	200	12,5	78	78	21,79	14,1	8,95	0-20,82
			300	30	76	96	5,3	0	5,3	2,2-8,4
			300	60	69	70	28,99	22,86	7,95	0-23,09
Valduno (Nalón)	3,8	Kaplan	122	25	68	98	7,35	4,34	3,15	0-9,85
			122	50	84	98	7,14	4,34	2,93	0-9,58
Puerto (Nalón)	8	Semi-Kaplan	275	11	82	93	19,51	3,23	16,82	8,26-25,38
			332	8	80	93	21,25	3,23	18,62	9,84-27,4
Olloniego (Nalón)	8,5	Semi-Kaplan	340	11	57	72	8,14	0	8,14	2,78-13,5

Pe: Probabilidad de recaptura del lote experimental; Pc: Probabilidad de recaptura del lote control; Me: Mortalidad bruta del lote experimental; Mc: Mortalidad bruta del lote control; M: Mortalidad corregida; IC: Intervalo de confianza para un nivel de significación $p < 0,05$ y con el límite inferior truncado a 0.

TABLA 4
 PORCENTAJE DE LOS DIFERENTES TIPOS DE LESIONES OBSERVADAS EN LOS PECES RECUPERADOS MUERTOS TRAS SU PASO POR LAS TURBINAS

Tipo de lesión	Priañes 200 rpm	Priañes 300 rpm	Valduno	Olloniego	Puerto
Decapitación o corte en agalla	24,28	7,15	28,57	14,29	26,67
Corte a nivel medio	50	67,86	0	57,14	26,67
Corte en zona posterior	10	0	0	0	0
Corte a nivel aleta dorsal	4,29	3,57	0	0	0
Exoftalmia	4,29	10,71	0	0	20
Lesiones y hemorragias internas	7,14	10,71	71,43	28,57	26,67
N.º total truchas lesionadas	70	28	7	7	30
N.º total truchas introducidas	300	400	200	200	100

cualquier otro elemento rígido. El segundo tipo de lesiones en orden de importancia son los cortes o desgarros a nivel de las agallas, que en muchos casos llegan a producir la decapitación de la trucha. Estas lesiones tienen su origen en el efecto de cizalladura provocado por los cambios bruscos de velocidad del flujo. Las exoftalmias y lesiones internas como la destrucción de la vejiga natatoria o hemorragias generalizadas se deben a las diferencias de presión. La existencia de diferentes presiones a lo largo del recorrido de los peces por la turbina tiene también consecuencias negativas por el efecto de cavitación, que se produce cuando la presión absoluta se hace inferior a la presión de vapor del agua formándose burbujas que, cuando llegan a zonas de alta presión, implosionan de forma violenta.

DISCUSIÓN

El procedimiento de marcaje ha permitido obtener estimaciones de mortalidad en todas las centrales hidroeléctricas estudiadas. La proporción de peces recuperados con este método ha sido elevada, permitiendo la obtención de estimaciones robustas (BURNHAM *et al.* 1987). La mayor tasa de recuperación de peces en los lotes control se debe a la mayor posibilidad de rotura del dispositivo de anclaje de la marca en los peces que atraviesan la turbinas y sufren importantes cambios de velocidad y presión. Durante las experiencias se han recuperado numerosos globos desprendidos de los peces, aunque no han sido tenidos en cuenta en los cálculos de mortalidad.

La comparación con resultados obtenidos en otras centrales de Europa y Estados Unidos permite encuadrar adecuadamente los datos de la experiencia. Las tasas de mortalidad obtenidas en las turbinas de las centrales del río Nalón se encuentran en los mismos órdenes de magnitud que las obtenidas en varias centrales francesas con turbinas Kaplan y similares características (tabla 5). En pruebas realizadas en turbinas Kaplan de centrales hidroeléctricas norteamericanas con velocidades de rotación entre 229 y 257 rpm también se han obtenido valores de mortalidad comprendidos entre 1 y 19%, con un valor medio del 7% (P. HEISEY, com. pers.). En general, la mortalidad de juveniles de salmónidos en turbinas Kaplan varía entre 5 y 20% en las numerosas experiencias realizadas en diversos países (ELVIRA *et al.* 1992b). STONE & WEBSTER (1992) señalan que la mortalidad real de los peces que atraviesan de forma natural las turbinas Kaplan alcanza un valor medio del 6%, aunque en ocasiones es tan sólo del 1-2%. Estos autores señalan que la mortalidad estimada con peces introducidos artificialmente en las turbinas es mayor, generalmente entre 10 y 30%, debido, entre otras causas, al estrés producido por el transporte y manejo.

La ausencia de diferencias significativas en las estimaciones de mortalidad de una misma turbina bajo diferentes condiciones de funcionamiento parecen indicar que las propias características de la turbina y del diseño de la central son las que condicionan más claramente la mortalidad inducida en los peces. Las diferencias obtenidas entre las turbinas de Priañes y Valduno son fácilmente atribuibles a

TABLA 5
MORTALIDAD DE PECES MIGRADORES EN TURBINAS HIDROELÉCTRICAS DE VARIAS CENTRALES DE FRANCIA (LARINIER & DARTIGUELONGUE 1989)

Central	Altura del salto (m)	Tipo de turbina	Velocidad (rpm)	Caudal (m ³ /s)	Tasa de recaptura	Mortalidad corregida
Tuiliere (Dordogne)	11,5	Kaplan	166,7	11,8	100	17
				20,7	100	12,5
				30	96	8,3
				39	100	14
Lailhacat (Gave d'Ossau)	5	Kaplan	165	7	29	11,5
				13	57,9	9,5
				19	61	4
Mauzac (Dordogne)	5	Francis	55	30	93	5,4
				55	96	5,3
Poutès (Allier)	61,5	Francis	428	8	61	41
				10,5	67,5	35,5
				14	93	48

la diferencia en la altura de salto, mucho más reducida en Valduno. La diferencia entre las turbinas de Puerto y Olloniego es más difícil de interpretar, ya que ambas centrales tienen alturas de salto similares y las turbinas son semi-Kaplan en ambos casos. Posiblemente, el mayor diámetro de la turbina de Olloniego favorezca una menor mortalidad. Las diferencias que existen entre las centrales con turbinas Kaplan y las centrales con turbinas semi-Kaplan se deben, entre otros aspectos, a la propia diferencia de diseño de ambos tipos de turbina, fundamentalmente a la imposibilidad de regulación del ángulo de las palas del distribuidor en las turbinas semi-Kaplan.

Al valorar los resultados obtenidos en una central concreta es preciso tener en cuenta el efecto aditivo que se produce cuando los esguines atraviesan sucesivamente todas las centrales hidroeléctricas presentes en el río en su descenso hacia el mar. En consecuencia, parece necesario analizar el problema de forma conjunta para toda una cuenca hidrográfica antes de plantear las correspondientes medidas de actuación.

Las soluciones para evitar o reducir la mortalidad de juveniles de salmón en turbinas hidroeléctricas pueden ser de dos tipos: adecuación de los diseños de las turbinas o instalación de barreras y dispositivos de paso para los peces. Entre las primeras parece recomendable la eliminación

de los espacios vacíos existentes entre las palas y el eje de la turbina que provocan flujos de agua a gran velocidad y exponen a los peces a diversos tipos de lesiones (MATHUR *et al.* 1996). La selección de los tipos de turbina o de las características de diseño del salto de agua que menor mortalidad provoquen es otra solución en esta misma línea. En este sentido son preferibles, en general, centrales con poco salto de agua y con turbinas Kaplan. La eficiencia de funcionamiento hidroeléctrico de la turbina se correlaciona positivamente con la supervivencia de los peces (LEDGERWOOD *et al.* 1990), por lo que puede resultar recomendable la adecuación tecnológica de instalaciones obsoletas en centrales existentes y la selección de modelos modernos y eficientes en centrales de nueva instalación.

Las barreras para impedir el acceso de los peces a las turbinas pueden ser físicas, eléctricas, sonoras, luminosas o de otros tipos, y requieren que se habilite además un paso alternativo para los peces por un canal de desviación, por el aliviadero de la presa o por otro dispositivo especialmente establecido (ELVIRA *et al.* 1998b). En las grandes centrales son soluciones costosas y precisan un buen estudio previo para garantizar su funcionamiento. En algunos casos se ha llegado a comprobar que la mortalidad de los peces al pasar por los aliviaderos de las centrales o por los

sistemas de bypass puede ser igual o mayor que al atravesar las turbinas (LEDGERWOOD *et al.* 1990, HEISEY *et al.* 1996). En centrales de derivación la solución suele ser más sencilla, ya que basta con evitar la entrada de los peces en el canal mediante una reja o un dispositivo disuasorio. Esta medida debe acompañarse con el mantenimiento de un régimen de caudales ecológicos en el tramo de río situado entre la toma y la salida de la central, que permita el descenso de los peces por este tramo en condiciones hidrológicas naturales.

La consecuencia directa del estudio de la mortalidad de peces migradores en las turbinas de las centrales del río Nalón ha sido la construcción en la actualidad de una rampa para descenso de peces acoplada al dispositivo de paso en la presa de El Furacón, que permitirá el descenso de los esguines de salmón sin atravesar las turbinas de la central de Priañes. En las centrales de derivación de Puerto y Olloniego, el paso de los peces por las

turbinas se evita mediante la instalación de rejas en la entrada del canal de toma.

AGRADECIMIENTOS

Los trabajos han sido financiados por el Principado de Asturias. Las empresas Hidroeléctrica del Cantábrico, Hidromedia e Hidroastur han permitido el desarrollo de las pruebas en sus respectivas centrales y han colaborado en todo momento para su ejecución. Los trabajos de campo han sido coordinados por los autores junto con José Luis Benito y Pablo González-Quirós y se ha contado con la participación de Francisco Alonso, José Andrade, Higinio Calvo, Jesús Fernández, María Luz Galán, Gustavo Gómez, José Luis González, Maximino Monjardín, Fermín Puente, Salvador Rodríguez, Elvira Rosal y Joaquín Rosal. Agradecemos a Benigno Elvira y a dos revisores anónimos su contribución a la mejora de la estructura y los contenidos del artículo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLANCO, J.C. & GONZÁLEZ, J.L. 1992. Libro Rojo de los Vertebrados de España. ICONA, Colección Técnica. Madrid. 714 pp.
- BURNHAM, K.P., ANDERSON, D.R., WHITE, G.C., BROWNIE, C. & POLLOCK, K.H. 1987. Design and analysis methods for fish survival experiments based on release-recapture. American Fisheries Society Monograph 5. 437 pp.
- CADA, G.F. 1990. A review of studies relating to the effects of propeller type turbine passage on fish early in life stages. North American Journal of Fisheries Management 10: 418-426.
- CRAMER, F.K. & OLIGHER, R.C. 1964. Passing fish through hydraulic turbines. Transactions of the American Fisheries Society 93: 243-250.
- DARTIGUELONGUE, J. & LARINIER, M. 1987. Evaluation des dommages subis par les juvéniles lors de leur passage à travers les turbines des microcentrales de St-Pée-sur-Nivelle et Lailhacar (Pyrénées atlantiques). En: M. Thibault & R. Billard (eds.). Restauration des rivières à saumons, pp. 175-182. INRA, París.
- DAVIES, J.K. 1988. A review of information relating to fish passage through turbines: implications to tidal power schemes. Journal of Fish Biology 33: 111-126.
- DOADRIO, I., ELVIRA, B. & BERNAT, Y. 1991. Peces continentales españoles. Inventario y clasificación de zonas fluviales. ICONA, Colección Técnica. Madrid. 221 pp.
- EICHER, G.J., BELL, M.C., CAMPBELL, C.J., CRAVEN, R.E. & WERT, M.A. 1987. Turbine related fish mortality: Review and evaluation of studies. Eicher Associates Inc. Electric Power Research Institute. Palo Alto, California. 75 pp.

- ELVIRA, B., NICOLA, G.G. & ALMODÓVAR, A. 1998a. Impacto de las obras hidráulicas en la ictiofauna. Dispositivos de paso para peces en las presas de España. Organismo Autónomo de Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente. Colección Técnica. Madrid. 208 pp.
- ELVIRA, B., NICOLA, G.G. & ALMODÓVAR, A. 1998b. Sistemas de paso para peces en presas. CEDEX, Ministerio de Fomento. Madrid. 113 pp.
- HEISEY, P.G., MATHUR, D. & RINEER, T. 1992. A Reliable tag-recapture technique for estimating turbine passage survival: Application to young-of-the-year American shad (*Alosa sapidissima*). Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 49: 1826-1834.
- HEISEY, P.G., MATHUR, D. & EUSTON, T. 1996. Passing fish safely: A closer look at turbine vs. spillway survival. Hydro Review 15(4): 2-6.
- LARINIER, M. & DARTIGUELONGUE, J. 1989. La circulation des poissons migrateurs: le transit à travers les turbines des installations hydroélectriques. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture 312-313 (Num Spécial): 1-93.
- LEDGERWOOD, R.D., DAWLEY, E.M., GILBREATH, L.G., BENTLEY, P.J., SANDFORD, B.P. & SCHIEVE, M.H. 1990. Relative survival of subyearling chinook salmon which have passed Bonneville Dam via the spillway or the second powerhouse turbines or bypass system. Report U.S. Army Corps of Engineers, Northwest Fisheries Center, Seattle, Washington. 64 pp.
- MATHUR, D., HEISEY, P.G., EUSTON, T., SKALSKI, J.R. & HAYS, S. 1996. Turbine passage survival estimation for chinook salmon smolts (*Oncorhynchus tshawytscha*) at a large dam on the Columbia River. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 53(3): 542-549.
- NICIEZA, A.G. & BRAÑA, F. 1995. Aplicación de las técnicas de retrocálculo al análisis de las relaciones entre diferentes etapas del crecimiento en los medios fluvial y marino. En: F. Braña (ed.). Biología y conservación del salmón atlántico (*Salmo salar*) en los ríos de la región cantábrica, pp. 87-105. ICONA, Colección Técnica. Madrid.
- NICIEZA, A.G., BRAÑA, F. & TOLEDO, M.M. 1991. Development of length-bimodality and smolting in wild stocks of Atlantic salmon, *Salmo salar* L., under different growth conditions. Journal of Fish Biology 38: 509-523.
- NICIEZA, A.G., TOLEDO, M.M. & BRAÑA, F. 1995. Los procesos de desarrollo de los juveniles en el medio fluvial: crecimiento, bimodalidad de tallas, maduración precoz y esguinado. En: F. Braña (ed.). Biología y conservación del salmón atlántico (*Salmo salar*) en los ríos de la región cantábrica, pp. 67-86. ICONA, Colección Técnica. Madrid.
- OLSON, F.W. & KACZYNSKI, V.W. 1980. Survival of downstream migrant coho salmon and steelhead trout through bulb turbines. Public Utility District n.º 1 of Cheland County, Wenatchee, Washington. 43 pp.
- POLLOCK, K.H., BUNCK, C.M., WINTERSTEIN, R.R. & CHEN, C.L. 1995. A capture-recapture survival analysis model for radio tagged animals. Journal of Applied Statistics 22: 661-672.
- SOKAL, R.S. & ROHLF, F.J. 1969. Biometry. The principles and practice of statistics in biological research (2nd edn). W.H. Freeman and Company, Nueva York. 859 pp.
- TRAVADE, F., DARTIGUELONGUE, J. & LARINIER, M. 1987. Dévalaison et franchissement des turbines et ouvrages énergétiques: l'expérience EDF. La Houille Blanche 1-2: 125-133.
- UTRILLA, C.G. & LOBÓN-CERVIA, J. 1999. Life-history patterns in a southern population of Atlantic salmon. Journal of Fish Biology 55: 68-83.