8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

2022 Lleida | 27 · 1 junio · juny julio · juliol | Cataluña Catalunya

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

8CFE - 281

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

Organiza

Sociedad Española de Ciencias Forestales SECF

Efectos en las escalas de peces producidas por cotas de niveles de agua no previstas aguas arriba y aguas abajo de la barrera

GARCÍA DÍAZ R.[1], ROBREDO SÁNCHEZ J. C.[1]. GARCÍA RODRÍGUEZ, J.L.[1].

[1] Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental. Universidad Politécnica de Madrid.

Resumen

En las escalas de artesas sucesivas de vertedero lateral sumergido con orificio de fondo (sumerged notch with bottom orifice fishways "SNOF") y de vertedero de hendidura vertical (Vertical Slot Fish, "VSF"), la variación de los niveles de agua en las láminas superior e inferior respecto de las cotas teóricas originan variaciones que producen modificaciones en los desniveles de láminas entre estanques, el desnivel entre el ultimo estanque y el río, y en el caudal descendente (flujos no uniformes). Estas modificaciones pueden perjudicar el funcionamiento de la escala, porque un exceso de caudal crea excesivas turbulencias en los estanques, y un desnivel excesivo entre el último vertedero y el río puede impedir el ascenso de los peces, por el contrario, un desnivel muy bajo disminuye el efecto "llamada". En esta comunicación se analiza cualitativamente las variaciones de estas variables debido a las fluctuaciones de los niveles aguas arriba y aguas abajo de la barrera, los resultados muestran que cuando el desnivel entre las láminas del río aumenta o disminuye entonces en la mayor parte de los casos, aumenta o disminuye el desnivel entre los estanques y el caudal, existiendo algunos casos indeterminados.

Palabras clave

Dispositivos de remonte, migración de ictiofauna, permeabilidad fluvial.

1. Introducción

Entre las diferentes clases de tipos de remontes de paso que se pueden construir en las barreras existentes en los ríos que impiden el libre tránsito de los peces migradores, es especialmente importante, el grupo definido como escalas y pasos técnicos y dentro de este grupo el más utilizado es el de las escalas artesas sucesivas, entre las que se diferencian las SNOF y las de VSF.

Las escalas de artesas son estructuras hidráulicas que consisten en un plano inclinado dividido por tabiques transversales que delimitan los estanques, de tal manera que todo el desnivel de la escala (H) queda divido en un número determinado de pequeños desniveles entre las láminas de agua de dos estanques sucesivos.

Las escalas VSF han sido ampliamente utilizadas (Tarrade et al. 2011). Las primeras VSF fueron construidas en el paso de "the Hell's Gate" en el rio Fraser en Canadá (Clay 1961), y son este tipo de escalas, cada vez más utilizadas para recuperar el libre tránsito de los peces, porque presentan la gran ventaja de permitir fluctuaciones grandes de los desniveles de agua del río, tanto aguas arriba como aguas abajo. Los valores de las fluctuaciones dependen de las dimensiones de cada escala~~,~~ y de la altura de la hendidura. Valores normales de estas hendiduras pueden ser de 1.50 m, (aunque pueden alcanzar alturas de 2.5 m e incluso superiores), lo cual permite unas fluctuaciones de 1.00 m sin requerir de un control de secciones~~,~~ (Larinier, 2002), si en la escala se han proyectado zócalos en las hendiduras de los estanques, entonces estas fluctuaciones pueden ser superiores, aunque siempre se debe garantizar que en todo momento la profundidad no sea inferior a 0.50 m). En las escalas SNOF las fluctuaciones son menores que en las de VSF porque los vertederos sumergidos son de menor altura, aunque también admiten fluctuación de los niveles del agua.

Entre otros autores, las escalas de artesas sucesivas han sido estudiadas por, Clay (1961), Gebler (1991), Larinier (2002) Wang *et al.* (2010), CHD (2016). El dimensionamiento de los estanques de las escalas de hendiduras verticales ha sido estudiado por Clay (1961), Rajaratnam *et al.* (1986) (1992), Andrew (1990), Katopodis (1990), Lenne (1990) Gebler (1991), Larinier (2002), Pena *et al.* (2006), Bermúdez *et al.* (2012), CHD (2016).

Larinier (1983) cuantifico por primera vez la potencia hidráulica máxima admisible que debe disiparse en los estanques, valores que han sido revisados por CHD (2016) proponiendo cifras superiores a las aportadas previamente por Larinier (1983).

El diseño de las escalas de estanques sucesivos requiere el conocimiento de las cotas de las láminas de agua en el río referentes a los caudales máximos y mínimos de cálculo, entre estos dos caudales se elige el que genere el máximo desnivel en la barrera, normalmente corresponde al caudal mínimo, a partir de este desnivel se realiza el cálculo del número de estanques y el desnivel entre estanques, una vez diseñada la escala con las dimensiones según los datos de partida, cualquier modificación de éstos, provocará la variación de los parámetros del flujo hidráulico.

El caudal que vierte por un orificio o por una escotadura o hendidura es calculado por una fórmula basada en la ley de Torricelli (Silva et al. 2019).

$$Q \;= C_s\, A\,\sqrt{2\;g\;\Delta h} \quad (1)$$

Donde Cs es el coeficiente de descarga que depende del tamaño y la forma de la obertura, A es el área de flujo de la obertura, g es la aceleración de la gravedad y Δh, es el desnivel entre las láminas de los estanques.

Las fórmulas más utilizadas para el cálculo del caudal que atraviesa la hendidura vertical son la de Larinier (2002) y la de Fuentes-Pérez *et al.* (2014).

La fórmula de Larinier (2002) tiene la siguiente expresión:

$$Q = C_d \cdot b \cdot h \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} ... \left[m^3 / s\right] \quad (2)$$

Donde, Q, es el caudal en m^3/s; h es la altura de vertido total; Δh, es el desnivel o altura de caída libre entre dos estanques; b es la anchura del vertedero; g, es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2) y C_d es el coeficiente del vertedero que varía entre 0.65 y 0.85 dependiendo de la forma y de la redondez del vertedero.

Otra fórmula del caudal que determina el flujo que desciende por la hendidura vertical es la de Fuentes-Pérez *et al* (2014).

$$Q_h = \frac{2}{3}\, C_{dh}\, b\, h^{1.5}\, \sqrt{2\;g\;\Delta \mathrm{h}} \quad (3)$$

Siendo.

$$C_{dh} \;= 0.72\,\left[1-\left(\frac{(h-\Delta h)}{h}\right)^{1.5}\right]^{0.33} \quad (4)$$

Combinando las dos fórmulas, resulta la expresión siguiente:

$$Q_h = \frac{2}{3}\, 0.72\,\left[1-\left(\frac{(h-\Delta h)}{h}\right)^{1.5}\right]^{0.33}\; b\, h^{1.5}\,\sqrt{2\;g\;\Delta \mathrm{h}} \quad (5)$$

Donde, Q_h, es el caudal que circula a través de la hendidura vertical y C_{dh}, es el coeficiente de descarga de la hendidura. El resto de las variables son conocidas.

Esta segunda fórmula presenta un coeficiente de gasto que no es constante, sino que depende del porcentaje de la parte sumergida del vertido. Estos investigadores han estudiado las VSF tanto en flujos uniformes (flujos donde las alturas de vertido son iguales en todos los estanques) como también en flujos no uniformes (flujos con alturas de vertido de distintos para cada estanque) llegando a obtener resultados cuantitativos con los que se puede determinar los valores del caudal y del desnivel entre estanques afectados por las variaciones de los niveles del río.

El método que se aplica para el diseño y cálculo de estas escalas se realiza de la siguiente manera, primeramente se determina el desnivel máximo entre las láminas superior e inferior del río para los caudales normales de funcionamiento (normalmente se suele producir con los mínimos caudales), conocido este desnivel, se elige el desnivel entre estanques más adecuado en función de la capacidad de nado de los peces existentes en el río, conocidos estos valores, dividiendo el desnivel máximo entren las láminas entre el desnivel entre estanques se determina el número de saltos que deberá tener la escala siendo el número de estanques, uno menos que el número de saltos, Martínez-Azagra (1999), Larinier (2002), García-Díaz (2016). Con estos valores y el caudal de cálculo asignado con la formulas anteriormente expuesta, se estima la altura de vertido y consecuentemente se ubican la cota de los vertederos.

Un parámetro que determina el diseño y cálculo de las escalas de artesas es la potencia hidráulica disipada en cada estanque debido a la turbulencia que se genera por la caída del agua de un estanque al siguiente

La fórmula que cuantifica la potencia hidráulica disipada por unidad de volumen es (Larinier 1983):

$$N = \frac{\rho * g * Q * \Delta h}{B * L * t_{med}} \left[W / m^3 \right] \quad (6)$$

Donde, ρ es la densidad del agua (Kg/m^3), g es la aceleración de la gravedad (m/s^2), Q es el caudal en m^3/s, Δh es la altura de vertido libre (m), B es la anchura de la artesa (m), L es la longitud de la artesa (m), t_{med} es la profundidad media (m).

Los valores comúnmente usados de la potencia hidráulica disipada fueron propuestos por Larinier (1983) y Bell (1986), aunque en aquellas investigaciones no había técnicas precisas de medición de las turbulencias, posteriormente el mismo autor Larinier y otros más han ido aportando valores más precisos.

En las escalas para salmones, se admiten valores de 200-250 W/m^3 (Bates ,2000; Larinier *et al.*2002) para sábalo, especies reófilas de los ríos y ciprínidos se admite 150 w/m^3 (Larinier et al, 2002) para peces de longitudes menores a 90 mm y aproximadamente la mitad de los peces tienen tallas entre 20 y 70 mm las potencias hidráulicas disminuyen a 40 o 50 W/m^3 según se han realizado en cuencas de Murray-Darling en Australia (Barrett and Mallen-Cooper, 2006; Stuart *et al.* 2008).

A partir de los valores de potencias admisibles se dimensionan los estanques para que, con los caudales máximos de funcionamiento de la escala, los volúmenes de los estanques sean capaces de disipar la potencia máxima admisible.

Evidentemente cuando varían los niveles de las láminas superior y/o inferior, también variarán las alturas de vertido, cambiarán los caudales y se reajustarán los desniveles entre las láminas de los estanques, modificándose las condiciones de vertido (flujos en régimen no uniforme). Obviamente los cambios de los niveles de las láminas inferior y superior se producirán frecuentemente, como por ejemplo en el caso en que el diseño se haya realizado para los caudales mínimos, que son los que originan el máximo desnivel, porque la mayoría de las veces habrá caudales superiores al de cálculo, o simplemente existen errores en los datos iniciales utilizados de los niveles del agua.

Consecuentemente es importante saber las consecuencias de los cambios de las variables de vertido, porque siempre que se produzcan variaciones en las cotas de las láminas superior e inferior de las barreras se producirán cambios, tanto en el caudal como en el desnivel entre estanques.

El análisis que se llevará a cabo es un análisis cualitativo y los resultados son también cualitativos, los cuales indican el sentido creciente o decreciente de las variaciones de los caudales, alturas de vertido y desniveles entre estanques, pero no se concretan los valores cuantitativos de estas variables. Para poder cuantificar y determinar estos valores se debe de desarrollar procesos de cálculo que determinen todas las variables hidráulicas en todos los estanques de la escala, porque los valores serán diferentes en cada estanque y estarán condicionados por los valores en los estanques anterior y posterior.

2. Objetivos

El objetivo general de este estudio es determinar el sentido de las variaciones del caudal de los desniveles de caída libre entre estanques por medio de un análisis cualitativo, debido a todas las posibles variaciones de los niveles del río por encima y por debajo de la barrera, respecto de los valores iniciales de cálculo aplicados en el diseño de la escala.

3. Metodología

En los análisis que se realizarán en este estudio se utilizará la formula (1), de Larinier (2002).

Una vez fijado la anchura "b" del vertedero y seleccionado el coeficiente de gasto más adecuado, las únicas variables que quedan son h y Δh.

De la ecuación (1) se observa que el caudal aumenta cuando aumenta la altura de vertido "h" y cuando aumenta el desnivel entre estanques Δh, o bien las dos variables.

El diseño de la escala se lleva a cabo a partir de la situación en que el desnivel "H" entre la cota de la lámina superior (C.L.s.) y la cota de la lámina inferior (C.L.i.) toma su máximo valor.

$$H = C.L.s. - C.L.i.$$

A partir de este valor se calculan los vertederos necesarios en función del desnivel entre estanques elegido Δh_o, cuyo valor está en función de la capacidad de nado de las especies existentes en el río. El número de estanques es inmediato porque es n-1 veces el número de vertederos.

Tomando como base lo que se ha denominado caso "0", donde todas las alturas de vertido "h_i" y los desniveles entre vertederos consecutivos coinciden con los desniveles entre las láminas de los estanques Δh, se realizarán variaciones de las cotas de las láminas de agua y se estudiarán las modificaciones producidas en los parámetros de vertido "y_i", y también en los desniveles de las láminas de agua entre estanques, los cuales, una vez realizada la modificación, ya no coincidirán con los desniveles entre vertederos.

Condición de continuidad. Caudal constante.

Como el caudal debe ser constante en cualquier sección, es posible aplicar esta condición para determinar los calados de vertido "h_{ij}" (donde "i "es la situación o caso y "j" es el vertedero "j"), como también de los desniveles entre estanques Δh_{ij}.

Puesto que el caudal debe ser el mismo en todos los vertederos para un caso concreto, "i":

Entonces para el vertedero j aplicando la fórmula 1. (Larinier (2002):

$$Q_j \ = C_d \, \mathrm{b} \, h_j \sqrt{2 * g * \Delta h_j}$$

Y para el vertedero j'.

$$Q_{j\prime} \ = C_d \, \mathrm{b} \, h_{j\prime} \sqrt{2 * g * \Delta h_{j\prime}}$$

Como el caudal debe coincidir entonces:

$$Q_j = Q_{j'}$$

Y operando se llega a la condición:

$$h_j^2 \, * \, \Delta h_j = h_{j\prime}^2 * \, \Delta h_{j\prime}$$

El mismo proceso se utiliza también para determinar si, para un caso "i", el caudal correspondiente "Q_i" es superior al caudal original del caso "0":

$$h_j^2 \, * \, \Delta h_j \, > \, h_0^2 \, * \, \Delta h_0$$

o es inferior:

$$h_j^2 \, * \, \Delta h_j \, < \, h_0^2 \, * \, \Delta h_0$$

Estas expresiones pueden ser utilizadas para estudiar todas las posibles variaciones de los valores de las láminas superior e inferior, con respecto a los valores iniciales del caso "0".

Si la cota de la lámina superior aumenta o disminuye, entonces la altura de vertido "h" en el primer vertedero varía en el mismo sentido y sigue siendo conocida porque la cota del vertedero es la misma.

Si la cota de la lámina inferior aumenta o disminuye, el valor de la altura de vertido sumergido en el último estanque "n" ($h_{n\,sub} = h_n - \Delta h_n$) varía en el mismo sentido y también es conocida porque son conocidas la cota del vertedero y la cota de la lámina del río.

4. Resultados

La variación del caudal se producirá cuando varían la altura de vertido y/o el desnivel de caída libre entre los estanques. Cuando aumentan o disminuyen las dos simultáneamente, entonces aumenta o disminuye el caudal en el mismo sentido. Si, por el contrario, una variable aumenta y la otra disminuye, entonces no se puede determinar "a priori" en qué sentido irá la variación del caudal.

Todos los posibles casos de variación de los niveles de las láminas superior e inferior de la barrera se exponen a continuación (en las tablas 1 y 2 están resumidos los resultados).

0. Situación inicial (Figura 1)

Partiendo de la situación inicial (asignada con el numero "0"), las cotas de las láminas superior e inferior son las originalmente para el diseño de la escala. Para este caso el caudal es Q_0, la altura de vertido total "h_0" y el desnivel de caída libre entre estanques Δh_0 son los mismos para todos los vertederos (García-Díaz, 2016).

1. Disminución de la cota de la lámina inferior del río (Figura 2)

La disminución de la cota de la lámina inferior del río, manteniéndose la cota de la lámina superior en su valor original, origina un aumento del desnivel entre las dos láminas con respecto al desnivel de la situación original "0", por lo tanto.

$$H_i > H_o$$

Como el desnivel total es la suma de todos los desniveles de cada vertedero:
para la situación "i" $H_i = \sum \Delta h_i$ y para la situación inicial $H_0 = n\,\Delta h_0$

Entonces:

$$\sum \Delta h_{1i} > n\,\Delta h_0$$

(El subíndice "$_{1i}$", indica que es el caso 1 y el vertedero "i").

Este fenómeno se produce en todos los casos en que aumente el desnivel H_i entre las lámina superior e inferior.

Como el nivel en la lámina superior se mantiene a la misma cota que en el caso "0", entonces también se mantiene igual la altura de vertido en este primer vertedero "h_{11}" ($h_{11} = h_0$).

En el último vertedero la altura de vertido sumergida "$h_{1n\,sub}$", que corresponde a la diferencia entre la altura total de vertido h_n en este vertedero "n" menos el desnivel de caída libre en este último vertedero Δh_{1n}, ha disminuido porque el nivel inferior del río ha disminuido con respecto a la situación original.

$$h_{1n\,sub} < h_{0\,sub}$$

En el último vertedero se produce un aumento de la altura de caída libre entre el último estanque y el río con respecto a la situación original: $\Delta h_{1n} > \Delta h_0$, como efecto de la bajada de nivel de la lámina inferior.

Este aumento de caída libre respecto de la situación original provoca a su vez que la altura de caída libre en el estanque anterior también aumente, y así se mantiene en los estanques siguientes, este efecto puede llegar al primer vertedero dependiendo de los casos, siendo éste el que sufra menor aumento, aunque siempre será mayor al valor inicial del caso "0".

$$\Delta h_{1i} > \Delta h_0$$

Por lo tanto, el efecto del aumento del desnivel entre estanques en el caso de que llegue hasta el primer vertedero producirá un aumento del caudal. porque, como ya se ha dicho, al ser mayor la caída libre en este caso "1" que en el caso "0", aumenta la variable Δh y si bien se mantiene igual la altura de vertido "h_{11}", entonces también aumenta el caudal que atraviesa la escala, con referencia a la situación inicial "0".

$$Q_1 > Q_0.$$

2. Aumento de la cota de la lámina superior del río (Figura 1)

Con el aumento de la lámina superior y manteniendo el mismo valor de la cota de la lámina inferior, entonces, el desnivel total entre las láminas del río "H" aumenta, y por lo tanto se produce el aumento de la suma de todos los desniveles entre láminas de estanques.

$$H_2 > H_1 \qquad \sum \Delta h_{2i} > n\,\Delta h_0$$

Al aumentar la cota de la lámina superior, y como la altura de la cota del vertedero se mantiene igual, se produce un aumento de la altura "h_{21}".

Como la lámina inferior se mantiene constante, entonces la altura de vertido sumergida en el último vertedero es igual a la altura de vertido sumergido del caso "0".

En este último vertedero se producirá el aumento de desnivel entre estanques mayor de toda la escala porque es en este vertedero donde se mantiene la altura sumergida igual ($h_{2n\,sub} = h_{0\,sub}$), y para compensar el aumento de la altura de vertido del primer vertedero, el desnivel entre este estanque y el río debe ser el mayor de todos los vertederos entonces será $\Delta h_{2n} > \Delta h_o$, y por lo tanto aumenta el caudal. Se llega a la misma conclusión simplemente observando que el desnivel entre estanques para todos los vertederos de esta situación es mayor que el desnivel entre estanques del primer caso “0”, (Δh_{1i}> Δh_0), luego por lo tanto al aumentar las dos variables aumenta el caudal.

$$Q_2 > Q_0$$

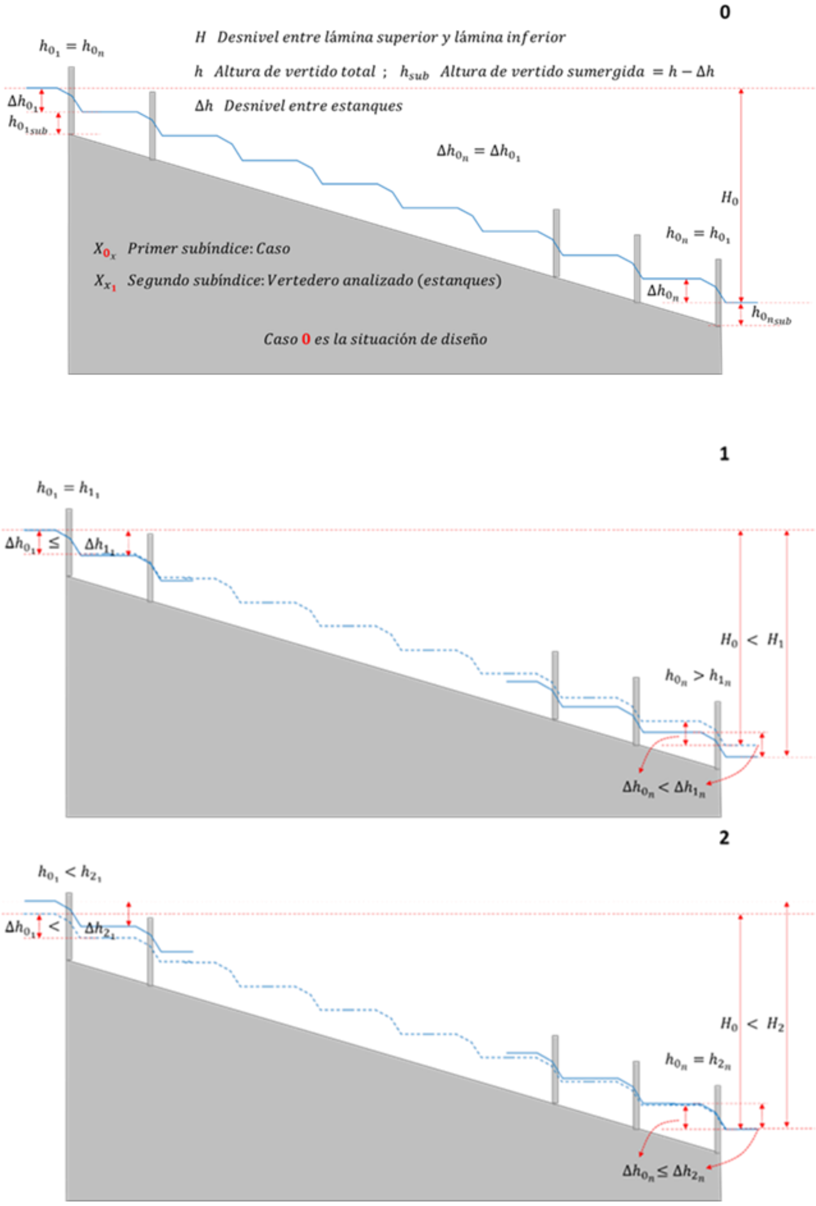

Figura 1. Esquemas de los casos 0. 1 y 2.

3. Aumento de la cota de la lámina superior y disminución de la cota de la lámina inferior (Figura 2)

Como aumenta el nivel de la lámina superior (caso 2) aumenta el vertido en el primer estanque (h_{31}>h_0).

Como disminuye el nivel de la lámina inferior (caso 1) ya se ha visto que aumenta el desnivel entre estanques para todos los vertederos $\Delta h_{3i} > \Delta h_0$

Por lo dos cambios, se produce un aumento del caudal.

$$Q_3 > Q_0$$

También se puede estudiar este caso simplemente observando que el 3º caso es la suma de los casos 1 y 2, por lo tanto, como en el caso 1, el caudal se mantenía constante o aumentaba ligeramente y en el caso 2 el caudal aumenta entonces el caudal en este caso "3" es mayor al caudal al caso "0".

El aumento del desnivel entre estanques siempre va a ser mayor en el último estanque porque como disminuye la cota inferior del río, también disminuye la altura sumergida de vertido en este último vertedero, y esta disminución es la mayor de toda la escala, si además se tiene en cuenta que el caudal aumenta, entonces el desnivel entre el último estanque y el río debe ser el mayor de todos para compensar estos dos cambios.

$$\Delta h_{3n} > \Delta h_{3i}$$

4. Aumento de la cota de la lámina inferior del río (Figura 2)

En este caso el efecto es el contrario al caso 2. El aumento de la lámina inferior manteniéndose la misma cota de la lámina superior implica que el desnivel entre las láminas disminuye con respecto a la situación "0".

C. L. i_4 > C. L. i_0 $H_4 < H_0$ $\sum \Delta h_{4i} < n\,\Delta h_0$

$\Delta h_{4i} < \Delta h_0$ en todos los vertederos

C. L. s_4 = C. L. s_0 $h_{41} = h_0$

Como aumenta la altura de la lámina inferior, también aumenta la altura de vertido sumergida en el último vertedero con respecto a la situación inicial "0".

$$h_{4n\,sub} > h_{0\,sub}$$

Entonces para compensar el aumento de la caída libre en este vertedero será la menor posible $\Delta h_{4n} < \Delta h_{4i}$

El máximo desnivel se producirá en el primer vertedero $\Delta h_{41} > \Delta h_{4i}$ (si bien sigue siendo menor a Δh_0).

Mientras que la lámina superior se mantiene constante: $h_{41} = h_0$.

Por lo tanto, la disminución de la caída libre puede remontar hasta el primer vertedero, pero en ningún caso en este vertedero será superior a la caída libre del caso inicial Δh_0, por consiguiente, el caudal Q_4 o se mantiene igual o disminuye ligeramente.

$$Q_4 \leq Q_0$$

5. Disminución de la cota de la lámina superior del río (Figura 4).

C. L. s_5 < C. L. s_0 $H_5 < H_0$ $\sum \Delta h_{5i} < n\,\Delta h_0$

C. L. i_5 = C. L. i_0 $h_{5nsub} = h_{0\,sub}$ (altura de vertido sumergida en el último vertedero es igual a la altura de vertido sumergida del caso "0").

En este caso "5", al mantenerse el mismo vertido sumergido en el último vertedero con respecto al caso "0", teniendo en cuenta que la altura de vertido en el primer estanque disminuye, para compensar en la escala se debe cumplir que en el último vertedero el desnivel entre estanques es el menor de todos ($\Delta h_{5n} < \Delta h_{51}$) y también es menor que el desnivel entre estanques del caso "0" ($\Delta h_{4n} < \Delta h_o$), y por lo tanto el caudal disminuye con respecto a la situación "0" porque aunque tiene el mismo vertido sumergido el desnivel entre el estanque y el río es menor, siendo esta la segunda variable de la que depende el caudal.

$$Q_5 < Q_o$$

6. Disminución de la cota de la lámina superior y aumento de la cota de la lámina inferior (Figura 2)

Este caso es la suma de los casos 4 y 5. Se producen los siguientes efectos.

- Disminución del desnivel entre laminas respecto del caso inicial $H_6 < H_0$, y por lo tanto.
    - $\sum \Delta h_{6i} < n \, \Delta h_0$ y $\Delta h_{6i} < \Delta h_0$ para todos los vertederos.
- Disminución de la cota de la lámina superior implica que la altura de vertido del primer vertedero disminuye $h_{61} < h_o$,. es el caso 5 y ya se ha demostrado que se produce una disminución del caudal.
- Aumento de la cota de la lámina inferior es el caso 4 y ya se ha demostrado que produce una ligera disminución del caudal o el caudal se mantiene el mismo.

Los dos efectos sumados producen una disminución del caudal para este caso “6” con respecto al caudal original (“0”).

$$Q_6 < Q_0$$

Para determinar si el aumento del desnivel de caída entre dos estanques Δh_{5i} es mayor en el primero o último vertedero, se depende de la siguiente casuistica.

6.1. La disminución de la cota en la lámina superior es mayor en valor absoluto que la disminución de la cota en la lámina inferior:

$$\left| C.L.s_6 - C.L.s_0 \right| > \left| C.L.i_6 - C.L.i_0 \right|$$

Entonces $h_{61} < h_{6n}$ y por lo tanto para compensar esta diferencia el desnivel en el primer estanque es mayor al desnivel en el último vertedero “n”:

$$\Delta h_{61} > \Delta h_{6n}$$

6.2. La disminución de la cota en la lámina superior es menor en valor absoluto al aumento de la cota en la lámina inferior.

$$\left| C.L.s_6 - C.L.s_0 \right| < \left| C.L.i_6 - C.L.i_0 \right|$$

Entonces la disminución del vertido en el primer estanque (h_{61}) es proporcionalmente menor que la disminución del vertido sumergido en el último estanque ($h_{6n\ sub}$) y en este caso, para compensar esta diferencia el desnivel en el último estanque es mayor al desnivel en el primer estanque:

$$\Delta h_{61} < \Delta h_{6n}$$

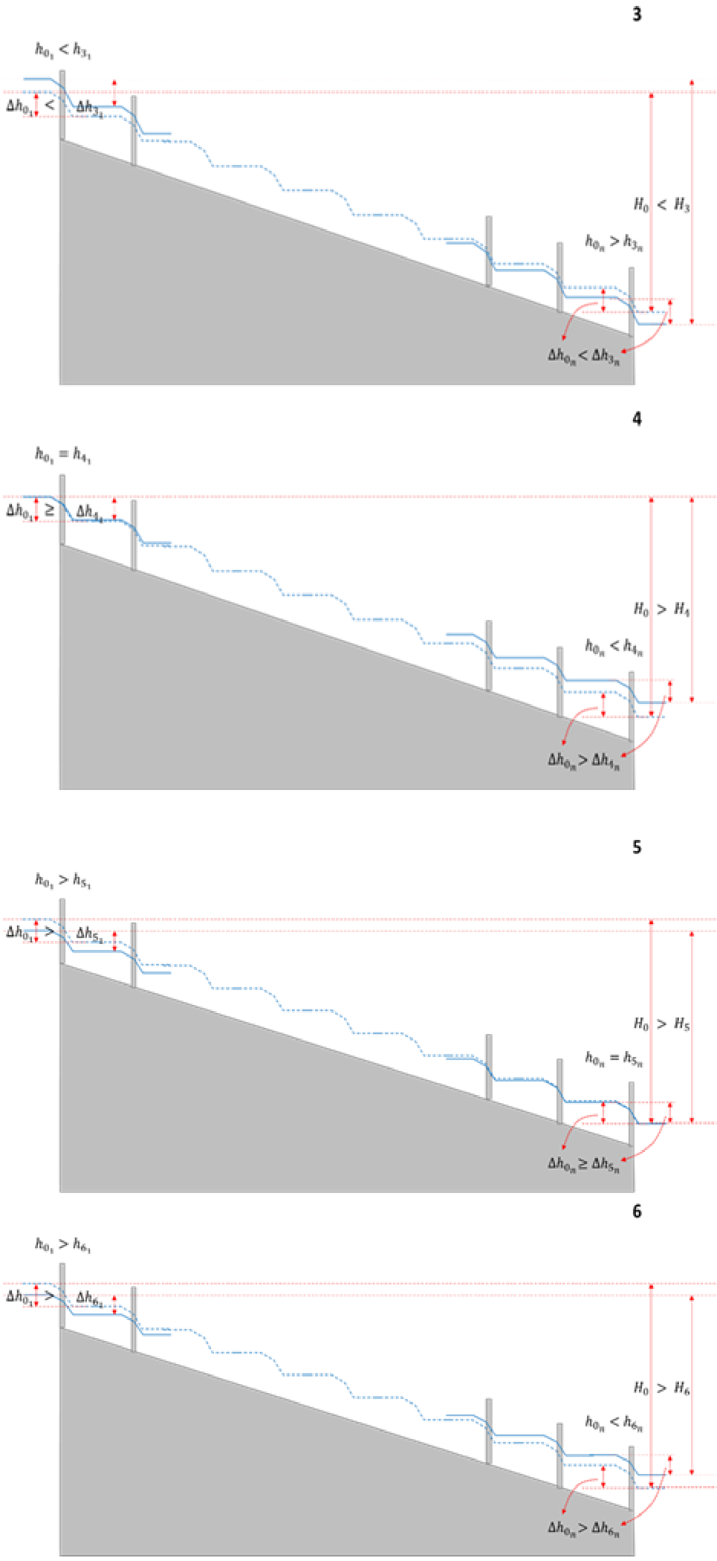

Figura 2. Esquemas de los casos 3, 4, 5, y 6.

7. Aumento de la lámina superior y aumento de la lámina inferior (Figura 3)
En este caso pueden suceder dos situaciones.

7. a. Aumenta el desnivel "H" entre la lámina superior y la lámina inferior con respecto a la situación inicial. Para que esta situación se produzca, el aumento de la lámina superior debe ser mayor al aumento de la lámina inferior.

$$\Delta\ C.\ L.\ s_{7a} = C.\ L.\ s_{7a} - C.\ L.\ s_0$$
$$\Delta\ C.\ L.\ i_{7a} = C.\ L.\ i_{7a} - C.\ L.\ i_0$$
$$\Delta\ C.\ L.\ s_{7a} > \Delta\ C.\ L.\ i_{7a}$$

Como el aumento de la lámina superior es mayor que la inferior, entonces la altura de vertido del primer vertedero h_{71} ha aumentado proporcionalmente más que la altura de vertido sumergida del último vertedero $h_{7n\ sub}$ lo cual implica que en este último vertedero el desnivel entre estanques Δh_{7an} será el mayor de todos, y también es mayor al desnivel entre estanques Δh_o, por lo tanto, el caudal debe aumentar porque la altura de vertido sumergida también es mayor que en el caso "0".

$$Q_{7a} > Q_0$$

7. b. Disminuye el desnivel "H" entre la lámina superior y la lámina inferior con respecto a la situación inicial ("0"), para que esta situación se produzca, el aumento de la lámina inferior debe ser superior al aumento de la lámina superior.

$$\Delta\ C.\ L.\ s_{7b} = C.\ L.\ s_{7b} - C.\ L.\ s_0$$
$$\Delta\ C.\ L.\ i_{7b} = C.\ L.\ i_{7b} - C.\ L.\ i_0$$
$$\Delta\ C.\ L.\ s_{7b} < \Delta\ C.\ L.\ i_{7b}$$

$$H_{7b} < H_0 \qquad \sum \Delta h_{7bi} < n\, \Delta h_0$$

En este último vertedero, como ha aumentado el valor del vertido sumergido en el último estanque $h_{7bn\ sub}$ en mayor proporción que el resto de la escala, el valor del desnivel entre este estanque y el río es el menor de todos y también menor que el del caso "0" $\Delta h_{7bn} < \Delta h_0$, por lo tanto, las dos variables se han modificado en sentido contrario y no es posible predecir la variación del caudal.

En el primer vertedero si bien ha aumentado la altura de vertido con respecto a la original y también el desnivel de caída libre es mayor que en el último vertedero, sin embargo, sigue siendo menor que el desnivel entre estanques que en el caso "0", por lo tanto, en cualquier caso, la variación del caudal es indeterminada.

La determinación del posible aumento o disminución del caudal con respecto de la situación inicial se realiza por medio de la desigualdad (7).

- $h_{7bj}^2 * \Delta h_{7bj} > h_0^2 * \Delta h_0$, (7b, corresponde al subíndice del caso 7b, y j es cualquier vertedero) entonces aumentaría el caudal.

- $h_{7bj}^2 * \Delta h_{7bj} < h_0^2 * \Delta h_0$, en esta situación el caudal disminuye.

8. Disminución de la lámina superior y disminución de la lámina inferior (Figura 3).
También en este caso se pueden dar dos situaciones.

8.a. Aumento del desnivel "H_{8a}" entre láminas superior e inferior del río con respecto a la situación inicial: $H_{8b} > H_0$, en este caso $\sum \Delta h_{8i} > n\,\Delta h_0$

Para que esta situación ocurra, entonces la disminución de la lámina inferior debe ser mayor en valor absoluto que la disminución de la lámina superior.

$$|\Delta\, C.\,L.\,s_{8a}| = |C.\,L.\,s_{8a} - C.\,L.\,s_0|$$
$$|\Delta\, C.\,L.\,i_{8a}| = |C.\,L.\,i_{8a} - C.\,L.\,i_0|$$
$$|\Delta\, C.\,L.\,s_{8a}| < |\Delta\, C.\,L.\,i_{8a}|$$

$$H_{8a} > H_0 \qquad \sum \Delta h_{8ai} > n\,\Delta h_0$$

Como la disminución máxima ha sido en el último vertedero, entonces será en este vertedero donde se produce el máximo desnivel entre el vertedero y el río, y viceversa en el primer vertedero ($\Delta h_{8an} > \Delta h_o$).

Pero como ha disminuido la altura de vertido sumergido en este último vertedero porque disminuye la cota de la lámina inferior, entonces las dos variables de las que depende el caudal varían en sentido contrario y por lo tanto no se puede predecir cómo será la variación del caudal.

Si se analiza el primer vertedero, en este caso la altura de vertido disminuye, pero aumenta el desnivel entre estanques (Δh_{8a1}) por lo tanto tampoco se puede predecir la variación del caudal.

De manera análoga al caso 7 b, la determinación de la variación del caudal se debe de confirmar analizando las desigualdades siguientes:

- $h_{8aj}^2 * \Delta h_{8aj} > h_0^2 * \Delta h_0$, (8a, corresponde al subíndice del caso, y, j, es cualquier vertedero), entonces aumentaría el caudal.

- $h_{8aj}^2 * \Delta h_{8aj} < h_0^2 * \Delta h_0$, en este caso el caudal disminuye.

8.b. Disminución del desnivel "H_{8b}" entre las láminas superior e inferior del río con respecto a la situación inicial: $H_{8b} < H_0$, y por lo tanto $\sum \Delta h_{8bi} < n\,\Delta h_0$

Para que se consiga esta situación, entonces se debe producir que la disminución en valor absoluto de la lámina superior debe ser mayor que la disminución en valor absoluto de la lámina inferior.

$$|\Delta\, C.\,L.\,s_{8b}| = |C.\,L.\,s_{8b} - C.\,L.\,s_0|$$
$$|\Delta\, C.\,L.\,i_{8b}| = |C.\,L.\,i_{8b} - C.\,L.\,i_0|$$
$$|\Delta\, C.\,L.\,s_{8b}| > |\Delta\, C.\,L.\,i_{8b}|$$

Entonces como la disminución de la altura de vertido es proporcionalmente mayor en el primer vertedero (h_{8a1}) que la altura de vertido sumergida del último vertedero ($h_{8an\ sub}$), será en el primer vertedero donde se produzca el mínimo desnivel entre estanques y también será inferior al desnivel del caso ("0")

$$\Delta h_{8b1} < \Delta h_0$$

Por consiguiente, al disminuir las dos variables de las que depende el caudal, es decir la altura de vertido y el desnivel entre estanques, respecto de la situación original, entonces el caudal disminuye.

$$Q_{8b} < Q_0.$$

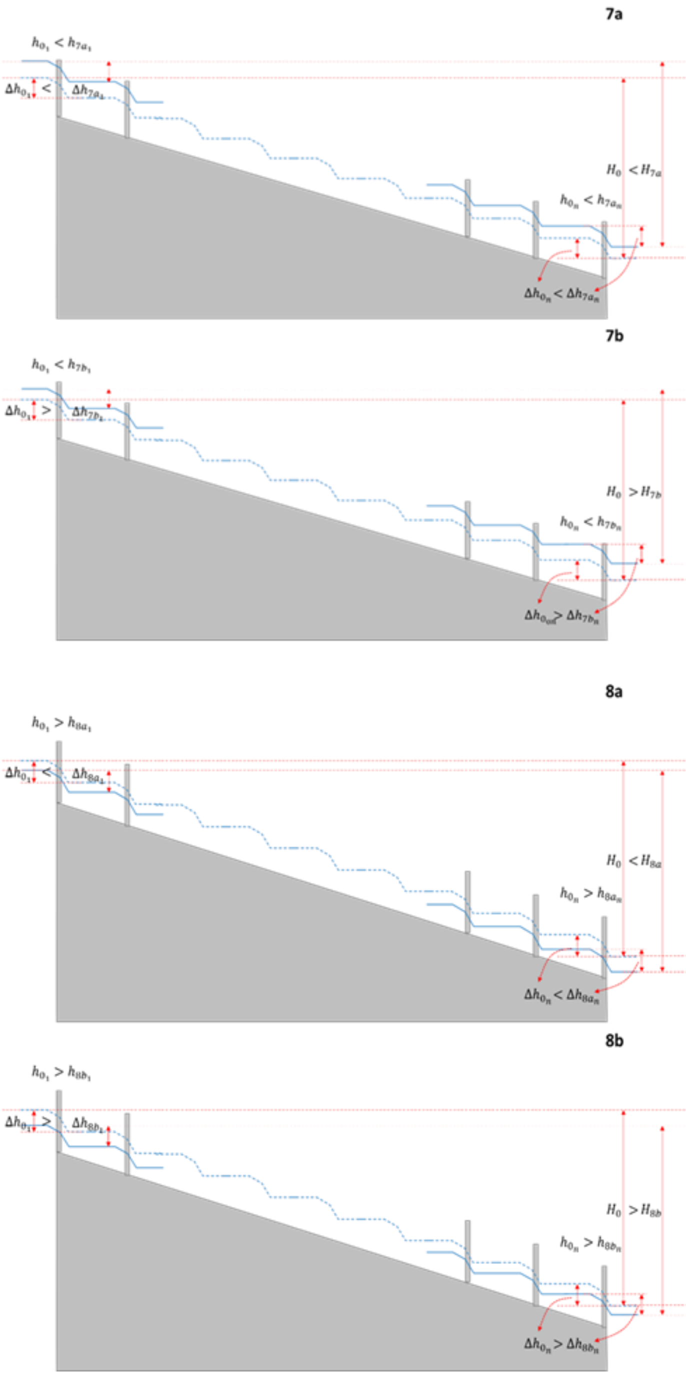

Figura 3. Esquema de los casos 7 y 8.

Tabla 1. Datos de los resultados de los casos 0, 1, 2 y 3.

Caso	C.L.s$_o$. Cota lámina superior	C.L.i$_o$. Cota lámina inferior.	Desnivel entre láminas Superior e inferior H = C.L.s. - C.L.i.	Δh Desnivel entre láminas de estanques	"y" Altura de vertido.	Efectos
0º Situación Normal	C.L.so	C.L.io	H_o = C.L.s$_o$ - C.L.i$_o$	Δh El desnivel es Idéntico en todos los vertederos	y_o Idénticos en todos los estanques	Todos los valores hidráulicos son iguales en todos los estanques.
1º Disminución de la lámina inferior del río	C.L.s$_1$ = C.L.so	C.L.i$_1$ < C.L.io y $CL_{s0} - CL_{io}$	H_1 = C.L.s$_1$ - C.L.i$_1$ $H_1 > H_0$	$\Delta h_{1i} > \Delta h_0$ $\sum \Delta h_{si} > n\Delta h_0$	$h_{11} = h_0$ $h_{1n\,sub} < h_{0\,sub}$	○ el desnivel máximo es en el último estanque (subíndice "n") y van disminuyendo hasta el mínimo en el primer estanque "1". ○ *Aumenta el caudal*. $Q_1 > Q_0$
2º Aumento de la lámina superior del río.	C.L.s$_2$ > C.L.s$_0$	C.L.i$_1$ = C.L.io	H_2 = C.L.s$_2$ - C.L.i$_2$ > > C.L.s$_0$ - C.L.i$_0$ $H_1 > H_0$	$\Delta h_{2ni} > \Delta h_0$ j $\sum \Delta h_{2i} > n\Delta h_0$	$h_{21} > h_0$ $h_{2n\,sub} = h_{0\,sub}$	○ el desnivel máximo es el último estanque (subíndice "n") y va disminuyendo hasta el primer vertedero. ○ *Aumenta el caudal*. $Q_2 > Q_0$
3º Aumenta de la cota de la lámina superior y disminución en la lámina inferior.	C.L.s$_3$ > C.L.s$_0$	C.L.i$_3$ < C.L.i.$_0$	$H_3 > H_0$	$\Delta_{h3i} > \Delta h_0$ $\sum \Delta h_{3i} > n\Delta h_0$	$h_{31} > h_0$ $h_{2n\,sub} < h_{0\,sub}$	○ Aumento de los desniveles en todos los estanques. Aumento de la altura de vertido en todos los estanques ○ *Aumento el caudal*. $Q_3 > Q_0$

Tabla 2. Datos de los resultados, 4, 5, 6, 7 y 8.

Caso	C.L.s₀. Cota lámina superior	C.L.i₀. Cota lámina inferior.	Desnivel entre laminas Superior e inferior H = C.L.s - C.L.i	Δh Desnivel entre láminas de estanques	y Altura de vertido.	Efectos
4º Aumento de la cota de la lámina inferior del río	$C.L.s_4 = C.L.s_0$	$C.L.i_4 > C.L.i._0$	$H_4 < H_0$	$\Delta h_{4n} < \Delta h_0$ $\sum \Delta h_{4i} < n\Delta h_0$	$h_{41} = h_0$ $h_{4nsub} > h_{0sub}$	○ El desnivel máximo es el primer vertedero ○ El caudal o disminuye o se mantiene igual $Q_4 \leq Q_0$
5º Disminución de la cota de la lámina superior.	$C.L.s_5 < C.L.s._0$	$C.L.i_5 = C.L.i._0$	$H_5 < H_0$	$\Delta h_{5i} < \Delta h_0$ $\sum \Delta h_{5i} < n\Delta h_0$	$h_{51} < h_0$ $h_{5nsub} = h_{0sub}$	○ El desnivel máximo es en el último vertedero ○ Disminuye el caudal $Q_5 < Q_0$
6º Disminución de la lámina superior y aumento de la lámina inferior	$C.L.s_6 < C.L.s._0$	$C.L.i_6 > C.L.i._0$	$H_6 < H_0$	$\sum \Delta h_{6i} < n\Delta h_0$	$h_{61} < h_0$ $h_{6nsub} > h_{0sub}$	○ Disminuye el caudal $Q_6 < Q_0$
7º Aumenta de las cotas de la lámina superior e inferior	$C.L.s_7 > C.L.s_0$	$C.L.i_7 > C.L.i._0$	Caso 7a $H_{7a} > H_0$	$\sum \Delta h_{7ai} > n\Delta h_0$	$h_{71} > h_0$ $h_{7nsub} > h_{0sub}$	○ Aumenta el caudal $Q_{7a} > Q_0$
			Caso 7b $H_{7b} < H_0$	$\Delta h7_{bi} < \Delta h_0$		Indeterminado
8º Disminución de las cotas de la lámina superior e inferior.	$C.L.s_6 < C.L.s_0$	$C.L.i_6 < C.L.i._0$	$H_{8a} > H_0$	$\sum \Delta h_{8ai} < n\Delta h_0$	$h_{81} < h_0$ $h_{8sub} < h_{0sub}$	Indeterminado
			$H_{8b} < H_0$	$\Delta h_{8bi} < \Delta h_0$		○ Disminuye el caudal $Q_{8b} < Q_0$

5. Discusión

Los casos que aumenta el caudal son 1, 2, 3, 7a y podrían ser el 7b y el 8a, el aumento del caudal también aumenta la potencia hidráulica disipada y por lo tanto las turbulencias. Los valores más utilizados como limites superiores de la potencia hidráulica son 150 w/m³ para los peces ciprínidos y 200 w/m³ para los peces de la familia salmónidos (Larinier 2002), La potencia hidráulica según se observa de la ecuación (6) depende del caudal y de la altura de caída libre y también depende del volumen del estanque, por lo tanto para cada escala y para cada caso los valores resultantes son distintos

En el resto de los casos el caudal disminuye, sin embargo, solo para los casos extremos en que el descenso del caudal lleve a disminuir excesivamente la profundidad en los estanques (la profundidad optima debe ser superior a 0.50 m), esta consecuencia no conlleva una situación límite de no funcionamiento en la escala, siempre y cuando está disminución de caudal no conlleve también el aumento excesivo del desnivel entre el último vertedero y el río.

El aumento del desnivel del último estanque con respecto del río. aumenta en los casos 1, 2, 3 y podría ser en los casos 7a, y 8b si el aumento es notable podría ser un problema para el ascenso de los peces, el valor cuantitativo máximo admisible depende principalmente de cada especie y del tamaño del ejemplar.

En los casos restantes es decir los casos 4, 5, 6, 7b 8 el desnivel entre el último estanque y el río disminuye. Los efectos prácticos dependen de la cuantía del mismo, una disminución pequeña puede favorecer el ascenso de los peces de menor tamaño, sin embargo, una disminución excesiva produce la perdida de "efecto llamada", el valor óptimo para el efecto llamada es de 0.20 m (CHD) a medida que este valor disminuye, también disminuye el efecto llamada, cuando el desnivel desciende hasta el valor de 0.05 m se considera que prácticamente no existe efecto llamada.

La determinación de los valores concretos de las variables tratadas, en una situación de régimen no uniforme, requiere el conocimiento de los niveles de agua a la entrada y a la salida de la estructura y el caudal circulante. Estás tres variables están relacionadas, pero el establecimiento de las distintas situaciones que puedan darse requieren de un amplio cálculo partiendo de dos de las variables para obtener el valor de la tercera. Poder abarcar todo el abanico de situaciones posibles, para analizar el efecto de la variación de unas dimensiones concretas, requiere de una potencia de cálculo que solo se puede llevar a cabo de manera razonable con el uso de programas informáticos,

Fuentes-Pérez *et al.* (2014) exponen un método de cálculo por medio de un algoritmo con el que se puede desarrollar el software apropiado, con el que es posible reproducir los flujos por las escalas y cuantificar los valores resultantes de los caudales y de los desniveles entre estanques debido a las variaciones de los niveles del río.

En las investigaciones de Rajaratnam (1986) y de Fuentes-Pérez *et al* (2014) se estudiaron experimentalmente los flujos en VSF tanto en regímenes uniformes como no uniformes, los resultados cuantitativos son coherentes a los resultados cualitativos obtenidos en el presente estudio cualitativo.

5 Conclusiones

- Cuando aumenta el desnivel entre láminas superior e inferior de la barrera aumenta la suma de todos los desniveles entre estanques con respecto a la situación "0", y en todos los vertederos los desniveles entre estanques son mayores que el desnivel entre estanques del caso “0”, si este aumento del desnivel es considerable, puede perjudicar al ascenso de los peces.

- Si el desnivel entre las láminas superior e inferior disminuye, entonces se produce el efecto contrario, es decir que la suma de los desniveles para estas situaciones es inferior al desnivel total de las láminas en la situación “0”, la disminución de los desniveles entre estanques favorece el ascenso de los peces, ahora bien, si en el vertedero inferior el descenso es muy grande se producirá disminución del efecto llamada.

- El aumento del caudal provocado por el aumento de la diferencia de niveles no previstos puede producir potencias hidráulicas disipadas superiores de las admisibles y perjudicar el tránsito de los peces migradores. Las potencias admisibles dependen de las especies de los peces, para los ciprínidos el límite suele ser 150 w/m^3, mientras que para los salmónidos el límite suele ser 200 w/m^3

- El desnivel entre las láminas de los estanques puede ser excesivo para el remonte de los peces, este aumento, en bastantes casos, es más acentuado en el último vertedero, especialmente cuando la disminución de la cota del agua es acentuada y/o cuando el aumento relativo del desnivel entre las láminas superior e inferior es grande y son pocos los estanques de toda la escala.

6. Bibliografía

ANDREW F.J. 1990. The use of vertical-slot fishways in British Columbia, Canada. Proc. Int. Sump. On fishways, , 267-274 p. Gifu; Japan

BELL M., 1986. Fisheries Handbook of engineering requirements and biological criteria – Fish Passage Development and Evaluation Program, US Army Corps of Engineers, North Pacific Division Portland, 290 pp. Oregon.

BERMÚDEZ, M; RODRÍGUEZ, A; CEA, L; MORCILLO, F; CASTILLO, M. Y ARAMBURU, E. 2012. Implications of Fish Behaviour for Vertical Slot Fishways Design. Resúmenes del IX Simposio Internacional de Ecohidráulica, Austria 9th International. Vienne

BATES K., 2000. Fishway guidelines for Washington State, Washington Department of Fish and Wildlife,57 p. Washington.

BARRETT J. AND MALLEN-COOPER M., 2006. The Murray River’s ‘Sea to Hume Dam’ fish passage program: progress to date and lessons learned. Ecol. Manage. Res., 7, 3, 173–183.

CHD, 2016. Manual para la evaluación de la funcionalidad de pasos para peces de estanques sucesivos. Metodología AEPS (1.0). Coordinación: Sanz-Ronda *et al*.; Autores: Valbuena-Castro *et al*. Ed. Confederación Hidrográfica del Duero. 139 pp. Valladolid.

CLAY, C. H. 1961. Design of fishways and other fish facilities. Dept. of Fisheries, 301 pp. Ottawa, Canada.

FUENTES-PÉREZ, J. F.; SANZ-RONDA, F.J.; MARTÍNEZ DE AZAGRA, A., y GARCÍA-VEGA, A. 2014 Modeling Water-Depth Distribution in Vertical-Slot Fishways under Uniform and Nonuniform Scenarios. J. Hyd. Eng. 140. 1-5.

GARCÍA-DÍAZ R. 2016. Escalas y pasos de peces. Ed. Organismo Autónomo Parques Nacionales. 279 pp. Madrid.

GEBLER, R. J. 1991. Naturgemäβe Bauweisen vonSohlenbauwerken und Fischaufstiegen zur Vernetzung der Flieβgewässer. Diss. Univ. Karlsruhe, Mitteilungen des Institutes für Wasserbau und Kulturtechnik, Nr. 181. Karlsruhe

KATOPODIS, C. 1990. Advancing the art of engineering fishways for upstream migrants. Proc. Intern. Symplosium on Fishways '90, Giuf, Japan

LARINIER M. 2002. Pool fishways, pre-barrages and natural bypass channels. Bull. Fr. Pêche Piscic. 364 suppl. pp 54-82.

LARINIER, M., 1983. Guide pour la conception des dispositifs de franchissement des barrages par les poissons migrateurs (Guide to designing fish passage facilities at dams for migratory fish). Bull. Fr. Pisc., special edition, 39 p.

LENNE D. 1990. Circulation des poissons migrateurs: franchissement des buses et étude hydraulique des passes à basssuccessifs. ENITRS-CEMAGREF Rep., Grenoble.

MARTINEZ-AZAGRA A. 1999. Escala para peces. Ed. E.T.S.I.A.A. Universidad de Valladolid 38 pp. Palencia.

PENA J.; PUERTAS J.; TEJEIRO T. y PEÑA E. 2006. Dispositivos de remonte para peces: Escalas de hendiduras verticales. Ing. Agua. Vol. 13 nº 2 pp 112-128. Córdoba (España).

RAJARATNAM, N; VAN DER VINNE, G.; KATOPODIS, C. 1986 Hydraulics of Vertical Slot Fishways. J. Hyd. Eng.. 909-927.

RAJARATNAM N. KATOPODIS C. SOLANKI S. 1992. New design for vertical slot fishways 2011 Can. J. Civ. Eng. 19 (3:402-414)

SILVA, A.; BERMÚDEZ, T.; SANTOS, M.; RABUÑAL, J. R y PUERTAS, J. 2020. Pool-Type Fishway Design for a Potamodromous Cyprinid in the Iberian Peninsula: The Iberian Barbel—Synthesis and Future Directions Sustainability; Tom 12, N.º 8,: 3387. Basel

STUART I.G., ZAMPATTI B.P. AND BAUMGARTNER L.J, 2008. Can a low gradient vertical-slot fishway provide passage for a lowland river fish community? Mar. Freshw. Res., 59, 332–346.

TARRADE, L.; PINEAU, G.; CALLUAUD, D.; TEXIER, A.; DAVID, L., y LARINIER, M. 2011. Detailed experimental study of hydrodynamic turbulent flows generated in vertical slot fishways. Environ. Fluid Mech., 11(1), 1–21.

WANG, R.W.; DAVID, L. y LARINIER M. 2010. Contribution of experimental fluid mechanics to the design of vertical slot fish passes. Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems.