

Diseño de un aforador modular de estrechamiento largo en un canal de desagüe para recirculación del agua en un campo de arroz

Design of a long-throated flume in a drainage channel for water recirculation in a rice field

José Roldán-Cañas¹, Francisco Javier Pérez-Ardoy² y María Fátima Moreno-Pérez^{3*}

¹Departamento de Agronomía, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Ctra. Madrid-Cádiz, km. 396. 14071 Córdoba, España.

E-mail: ¹jroldan@uco.es, ²franciscojavierperezardoy@gmail, ³mfatima@uco.es

*Autor para correspondencia

Recibido: 12/07/2023

Aceptado: 18/09/2023

Publicado: 31/10/2023

Citar como: Roldán-Cañas, J., Pérez-Ardoy, F.J., Moreno-Pérez, M.F. 2023. Design of a long-throated flume in a drainage channel for water recirculation in a rice field. *Ingeniería del agua*, 27(4), 237-251. <https://doi.org/10.4995/la.2023.20043>

RESUMEN

El arroz es regado por inundación manteniendo una altura de agua constante y alcanzando unos requerimientos de agua elevados. A la salida de la parcela hay un canal de desagüe cuyo control permitirá establecer prácticas para reducir el gran consumo de agua. Se ha diseñado un aforador de estrechamiento largo para cubrir el intervalo completo de caudales a aforar. Puesto que el canal de desagüe tiene una sección trapecial, la garganta del aforador será también trapecial para disminuir las pérdidas de carga. Un nuevo procedimiento se ha desarrollado en una hoja de cálculo Excel que permite diseñar directamente las dimensiones de la sección estrechada, talud de las paredes y anchura de la base, eligiendo previamente el límite modular, la altura del umbral y la longitud del estrechamiento más en concordancia con las características del canal. Los resultados demuestran la precisión y viabilidad del procedimiento.

Palabras clave | aforador de estrechamiento largo, canal, riego, hoja Excel, arroz.

ABSTRACT

Rice is grown under anaerobic conditions by means of flood irrigation that maintains a constant water depth reaching high volume water needs. At the outlet there is a drainage channel. Its control will allow us to establish practices to reduce the high water consumption. We have designed a long-throated flume that can cover the entire range of flow rates to measure. Since the drainage channel has a trapezoidal cross section, the throat of the flume will also be trapezoidal to reduce head losses. A new procedure has been developed in an Excel spreadsheet that allows to directly design the dimensions of the narrowed section, side slope and crest width, by previously choosing the modular limit, the sill height, and the length of the throat more in accordance with the characteristics of the channel. The analysis of the obtained results demonstrates the accuracy and feasibility of the procedure.

Key words | long-throated flume, channel, irrigation, Excel spreadsheet, rice.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El aforo en redes de distribución del agua es fundamental para hacer un uso racional del agua, entregar los módulos precisos a los usuarios, evitar fricciones entre ellos, hacer una medición sistemática de las pérdidas y evaluar el uso exacto del agua para tarifarlo por consumo real. La importancia del control sobre el uso del agua, en especial la de riego, es mayor cuando se producen periodos de sequía como en el que nos encontramos actualmente en el sur de España.

No es frecuente que los sistemas de riego tradicionales, donde el agua se distribuye por canales y acequias, dispongan de elementos de aforo en parte debido a la pérdida de cota, y por tanto de superficie dominada, producida al utilizar medidores, como los vertederos, con bajo límite modular. Los aforadores modulares de estrechamiento largo, por el contrario, tienen un diseño que les permite alcanzar límites modulares elevados, por encima del 80% (Domínguez *et al.*, 1984), lo que los convierte en idóneos para su uso en conducciones libres.

Desde siempre, se ha pretendido diseñar un aforador para régimen libre con unas características similares a las que tiene el Venturi en conductos a presión. Quizás el prototipo que alcanzó una mayor similitud fue el denominado aforador Parshall (Parshall, 1945) que se ha estado usando durante la segunda mitad del siglo xx. Sin embargo, sus diferentes modelos no cumplían entre sí con el requisito de satisfacer las leyes de semejanza por lo que para cada uno se requería una diferente ecuación de gasto con parámetros obtenidos experimentalmente que son solo válidos para dicha estructura.

Aunque basadas en principios hidráulicos sencillos, los problemas de cálculo y de resolución de sus ecuaciones de aforo hicieron que no fuera hasta el último cuarto del siglo xx (Ackers *et al.*, 1978; Bos, 1978, 1984) cuando se desarrollan los aforadores modulares, que ya cumplían con esa condición de semejanza. El término “modular” hace alusión a la necesidad de que en la garganta de estrechamiento se produzca régimen crítico de modo que con la simple lectura de la carga de vertido en la sección de aproximación se pudiera obtener el caudal.

Aunque previamente se han propuesto otros procedimientos de diseño de la garganta de un aforador de estrechamiento largo (por ejemplo, Wahl *et al.*, 2005) basados principalmente en el programa WinFlume (Bautista *et al.*, 2020, en su última versión), en este trabajo se presenta una nueva metodología que proporciona directamente los parámetros de la sección de control con un procedimiento más preciso que, por ejemplo, el de Vantakhah y Mahdvi (2012).

El principal objetivo de este trabajo es proporcionar un diseño rápido automatizado usando una hoja de cálculo Excel que permite obtener directamente las dimensiones de la sección del estrechamiento de una canal de garganta larga, escogiendo previamente el límite modular, la altura del umbral y la longitud de la garganta que estén más en consonancia con las características del canal donde se va a instalar el aforador y que garanticen la medida del flujo en el intervalo de caudales deseado.

MATERIAL Y MÉTODOS

El procedimiento descrito se ha aplicado en el diseño de un aforador para medir el gasto en un canal de desagüe de una parcela de 15 ha cultivada de arroz y situada en las marismas del valle del Guadalquivir (ver Figura 1). El arroz es cultivado en condiciones anaeróbicas mediante un riego por inundación que mantiene una altura de agua constante durante gran parte del ciclo del cultivo. De este modo, las necesidades de agua alcanzan un elevado volumen de entre 12 000 y 14 000 m³/ha.

En la salida de la parcela hay un canal de desagüe donde no existen dispositivos de medida del caudal. Su control nos permitirá establecer prácticas de riego para reducir el elevado consumo de agua. El caudal drenado varía en función del caudal de entrada, de la etapa de crecimiento del cultivo y de los periodos de seca (Ishfaq *et al.*, 2020) por lo que para medirlo se requiere el uso de un dispositivo que sea capaz de abarcar un amplio intervalo de caudales que, en este caso, se ha estimado entre $Q_m=0.02$ y $Q_M=0.05$ m³/s. Las características del canal de desagüe de sección trapezoidal son: $b_{ca}=0.4$ m; $z_{ca}=1.1798$ ($\theta/2=49.71^\circ$) (ver Figura 2); I (pendiente)=0.002; n (coeficiente de aspereza de Manning)=0.025; p_c (profundidad del canal)=0.89 m.

El aforador modular de estrechamiento largo consiste en una estructura convergente-divergente que interpuesta en una corriente libre permanente subcrítica es capaz de imponer el régimen crítico en la sección de control (ver Figura 3). La aceptación

de régimen uniforme tanto en la sección de aproximación como en la sección estrechada facilita el desarrollo analítico y, de ahí, que la garganta deba ser de suficiente longitud en relación con la carga de vertido para poder aceptar régimen uniforme en la misma. Tampoco debe ser muy larga ya que las pérdidas de energía aumentarían proporcionalmente.

El estrechamiento de la caja del canal ya sea por efecto del recrecimiento de la solera, por acercamiento de las paredes o por ambas a la vez, origina una elevación del nivel aguas arriba produciéndose unas pérdidas de energía ΔH que debe ser suficiente para que el desagüe desde el estrechamiento sea libre y se produzca régimen crítico. El límite de utilización depende del cociente (H_2/H_1) llamado relación de sumergencia que no debe superar el denominado límite modular, L , cuyo valor depende del caudal y debe determinarse experimentalmente para cada aforador. Con un diseño adecuado de los tramos de convergencia y divergencia, en especial este último, se producirán pocas pérdidas de energía y L será alto lo que caracteriza a estos aforadores (Domínguez *et al.*, 1984).

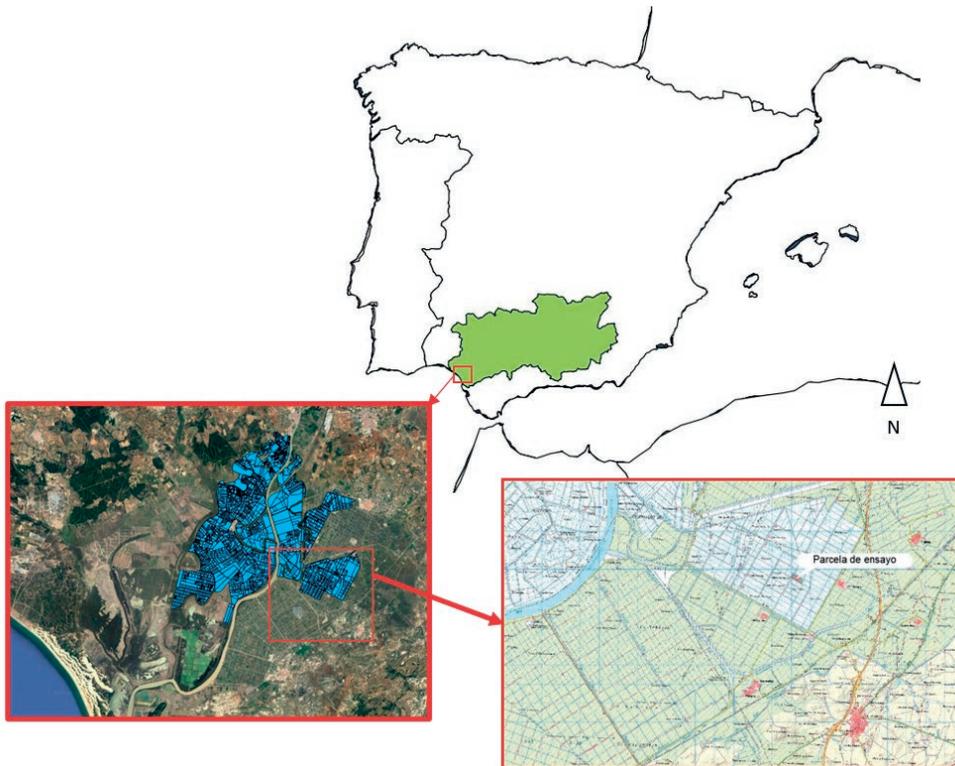


Figura 1 | Localización de la parcela de ensayo.

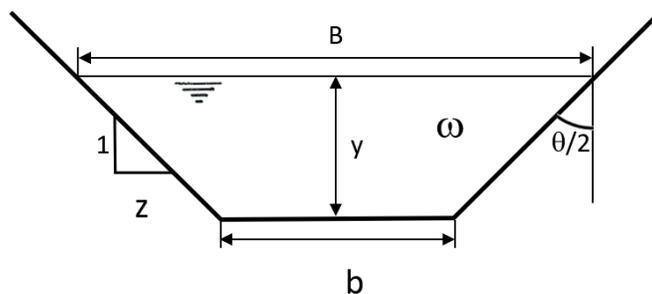


Figura 2 | Sección transversal del canal ($z=z_{ca}$; $b=b_{ca}$) y de la sección de estrechamiento ($z=z_c$; $b=b_c$).

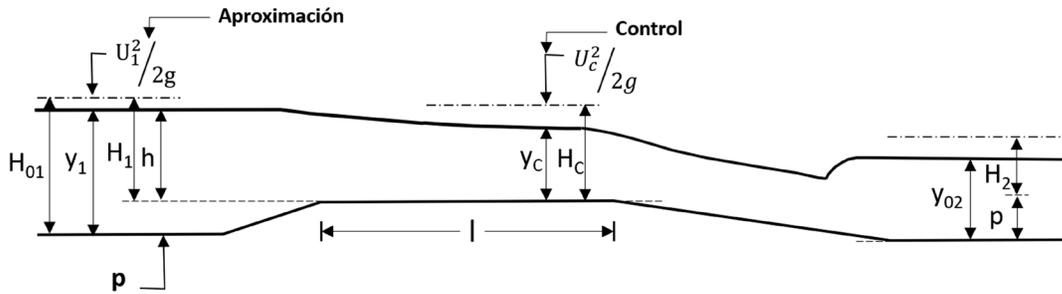


Figura 3 | Sección longitudinal de un aforador modular de estrechamiento largo.

La forma geométrica de la garganta puede ser diversa siendo habituales las secciones trapeciales, rectangulares, parabólicas y circulares. En general, es preferible que tenga la misma forma que la del canal donde se instala ya que su construcción y transición entre ambas será más fácil y con menos pérdidas de carga. El procedimiento que se va a presentar se ha particularizado para la sección trapecial, que engloba a las secciones rectangulares ($z_c=0$) y triangulares ($b_c=0$), pero es generalizable a cualquier otra forma de sección transversal.

El diseño de la sección de control de forma trapecial es el más complejo pues implica el cálculo de dos parámetros, b_c y z_c (ver Figura 2). Para ello, Domínguez *et al.*, 1984) partían del intervalo de caudales que se deseaba medir (Q_M ; Q_m) y, aplicando la ecuación de Manning (1), obtenían los calados, y_M , y_m , con los que circularían por el canal. Despreciando el sumando cinético en una primera aproximación, $H_1=h=y_1-p$ (ver Figura 3), disponían de un par de valores iniciales (Q_M , H'_M) y (Q_m , H'_m) con los que proceder a calcular b_c y z_c . Cada diseño de la sección estrechada se hace para diferentes valores de p que oscilan desde cero hasta un máximo del 15% del calado en la sección de aproximación, y_{1M} .

$$Q = \frac{1}{n} \cdot \omega \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (1)$$

donde: ω es la sección transversal del canal (m^2) y R : Radio hidráulico (m).

Sin embargo, al instalar el aforador, la carga aguas arriba $H_1 > H'_1$, es decir, los valores de energía son mayores a los que consideraron dichos autores. Una estimación del valor de la energía en la aproximación puede hacerse considerando que aguas abajo del aforador se restablece el régimen uniforme que existía en el canal sin aforador, de modo que H_2 (ver Figura 3) coincide con el nivel de energía considerado por Domínguez *et al.* (1984) y, por tanto, $H_1=(H_2/L)$ siendo L el límite modular. En consecuencia, los valores de H de los que se partiría serían:

$$H_{1M} = H_{2M}/L; H_{1m} = H_{2m}/L \quad (2)$$

En una primera aproximación, se parte del supuesto de fluidez perfecta, $H=H_1=H_c$ (ver Figura 3), y el caudal se obtiene mediante:

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \cdot b_c \cdot H \cdot \sqrt{g \cdot H} \cdot C_g \quad (3)$$

donde:

C_g es el coeficiente geométrico o de forma que se calcula como:

$$C_g = (1 + 2 \cdot C_{y_c}) \cdot \left(\frac{1 + C_{y_c}}{1 + \frac{5}{3} \cdot C_{y_c}}\right)^{3/2} \quad (4)$$

$$\text{con } C_{y_c} = \frac{z'_c \cdot Y_c}{b'_c}$$

$$C_{y_c} = \frac{1}{10} \cdot \left[(4 \cdot C_H - 3) + \sqrt{(4 \cdot C_H - 3)^2 + 40 \cdot C_H} \right] \quad (5)$$

$$\text{con } C_H = \frac{z'_c \cdot H}{b'_c}$$

La expresión final $C_g(C_H)$ es prácticamente imposible de obtener analíticamente por lo que resulta más fácil ajustar una ecuación a los pares de valores (C_g, C_H) que, representando dichos valores, se observa que es de tipo lineal:

$$C_g = m \cdot C_H + n \quad (6)$$

El ajuste nos proporciona los valores de m y de n .

Combinando las ecuaciones (3) y (6) se llega a la expresión:

$$\frac{Q}{\left(\frac{2}{3}\right)^{(3/2)} \cdot \sqrt{g} \cdot b'_c \cdot H^{3/2}} = C_g = m \cdot C_H + n \quad (7)$$

que, particularizada para los pares de valores (Q, H') da lugar a:

$$\text{Para } \{Q_M, H'_M\} \rightarrow \frac{Q_M}{\left(\frac{2}{3}\right)^{(3/2)} \cdot \sqrt{g} \cdot b'_c \cdot H'^{3/2}_M} = m \cdot \left(\frac{z'_c \cdot H'_M}{b'_c}\right) + n \quad (7')$$

$$\text{Para } \{Q_m, H'_m\} \rightarrow \frac{Q_m}{\left(\frac{2}{3}\right)^{(3/2)} \cdot \sqrt{g} \cdot b'_c \cdot H'^{3/2}_m} = m \cdot \left(\frac{z'_c \cdot H'_m}{b'_c}\right) + n \quad (7'')$$

La resolución de este sistema de ecuaciones nos proporciona los valores buscados de b'_c y de z'_c .

$$b'_c = \frac{\frac{Q_M}{H'^{5/2}_M} - \frac{Q_m}{H'^{5/2}_m}}{\left(\frac{2}{3}\right)^{(3/2)} \cdot \sqrt{g} \cdot n \cdot \left(\frac{1}{H'_M} - \frac{1}{H'_m}\right)} \quad (8)$$

$$z'_c = \left[\frac{Q_M}{\left(\frac{2}{3}\right)^{(3/2)} \cdot \sqrt{g} \cdot b'_c \cdot H'^{3/2}_M} - n \right] \cdot \frac{b'_c}{m \cdot H'_M} \quad (9)$$

Para fluido real, los valores de m y n permanecen invariables en tanto que los nuevos valores de b'_c y z'_c se obtienen a partir de la ecuación de gasto para fluido real:

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \cdot b_c \cdot H \cdot \sqrt{g \cdot H} \cdot C_g \cdot C_d \quad (3')$$

Donde C_d es el coeficiente de gasto que se obtiene a partir de la expresión (Bos, 1978):

$$C_d = \left(\frac{H}{l} - 0,07\right)^{0,018} \quad (10)$$

siendo H/l el parámetro motriz y l la longitud de la garganta que se calcula a partir de la ecuación:

$$H/l = \left(\frac{H_M + H_m}{l}\right) \text{ con } 0,1 < H/l < 1,0 \quad (11)$$

De donde, siguiendo el mismo procedimiento que antes, pero ahora para los pares de valores (Q,H), se obtienen los valores de anchura de la base, b_c , y talud, z_c , de la sección estrechada:

$$b_c = \frac{\frac{Q_M}{C_{dM} \cdot H_M^{5/2}} - \frac{Q_m}{C_{dm} \cdot H_m^{5/2}}}{\left(\frac{2}{3}\right)^{(3/2)} \cdot \sqrt{g} \cdot n \cdot \left(\frac{1}{H_M} - \frac{1}{H_m}\right)} \quad (8')$$

$$z_c = \left[\frac{Q_M}{\left(\frac{2}{3}\right)^{(3/2)} \cdot \sqrt{g} \cdot b_c \cdot H_M^{3/2} \cdot C_{dM}} - n \right] \cdot \frac{b_c}{m \cdot H_M} \quad (9')$$

Finalmente, la aplicación de la fórmula completa del caudal (Domínguez *et al.*, 1984) serviría para comprobar el diseño realizado:

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \cdot \sqrt{g} \cdot C_g \cdot C_d \cdot C_u \cdot b_c \cdot h^{3/2} \quad (3'')$$

Donde C_u es el coeficiente de velocidad calculado mediante (Domínguez *et al.*, 1984):

$$C_u = \left(1 + \frac{1}{2} \cdot R_a^2 \cdot C_u^2\right)^{\frac{3}{2}} \quad (12)$$

$$\text{siendo } R_a^2 = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot C_g \cdot C_d \cdot \frac{b \cdot h}{\omega_1} \quad (13)$$

Con ω_1 = área sección de aproximación.

El cálculo del caudal se hace aplicando la ecuación (3'') tras medir la carga limnimétrica h . Sin embargo, los coeficientes C_g y C_d dependen de H por lo que, inicialmente, se empiezan los cálculos con $H=h$. Una vez obtenido el primer valor del caudal, Q' , se calcula el siguiente valor, H_n como $H_n = h + \frac{(Q'/\omega_1)^2}{2g}$, y así sucesivamente hasta que se repita el valor del caudal lo que ocurrirá en muy pocas iteraciones.

Una solución muy usada por ser constructivamente muy fácil de realizar consiste en mantener el talud de la sección de aproximación en la sección del estrechamiento: $z_{ca} = z_c$

Bajo este supuesto, solo se tiene una incógnita a calcular, b_c que se puede obtener usando un único par de valores (Q_M, H_M):

$$b_c = \frac{\left(\frac{Q_M}{\left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \cdot \sqrt{g} \cdot H_M^{3/2}}\right) - m \cdot z_c \cdot H_M}{n} \quad (14)$$

En esta situación, cuando el caudal circulante es Q_m se debe cumplir también la ecuación (14) para (Q_m, H_m), lo que permite calcular H_m conservando el mismo valor de b_c . La relación (H_{m2}/H_{m1}) debe ser menor que L para aceptar el diseño propuesto. Sin embargo, para los valores inferiores de L dentro del intervalo considerado es posible que no se encuentre una solución al problema ya que se requieren mayores pérdidas de carga y el estrechamiento solo se consigue levantando el umbral de la solera, p , que ahora ya no puede ser igual a cero.

RESULTADOS

El procedimiento de cálculo se ha desarrollado sobre una hoja Excel (https://drive.google.com/drive/folders/1xJoLBiQ5IySAF0H-NRDMrfxB3q4UoD_f?usp=sharing) siguiéndose el proceso mostrado en el diagrama de flujo (Figura 4). Las recomendaciones de diseño han sido tomadas de Wahl *et al.* (2000, 2005).

En primer lugar, se calcula el calado aguas abajo usando la ecuación de Manning y, adoptando un valor para el umbral en la sección estrechada, p , se obtienen los valores de la energía en el tramo aguas abajo. Para un determinado valor del límite modular, L , que puede oscilar entre 0.5 y 0.9, se calculan, a continuación, los valores de energía y de calado aguas arriba del aforador de modo que el valor máximo del umbral p debe ser menor que el 15% del calado en la sección de aproximación, y_{1M} . Posteriormente, se adopta un resguardo igual al 0.2 y_{1M} y se comprueba si se supera la cota constructiva del canal. Si alguno de estos supuestos no se cumple hay que disminuir p o el caudal máximo que se puede aforar sería inferior a Q_M . También se comprueba que el número de Froude, IF_1 , sea menor de 0.5 en la sección de aproximación tanto para Q_M como para Q_m . Si no es el caso, habría que aumentar p o disminuir Q_M .

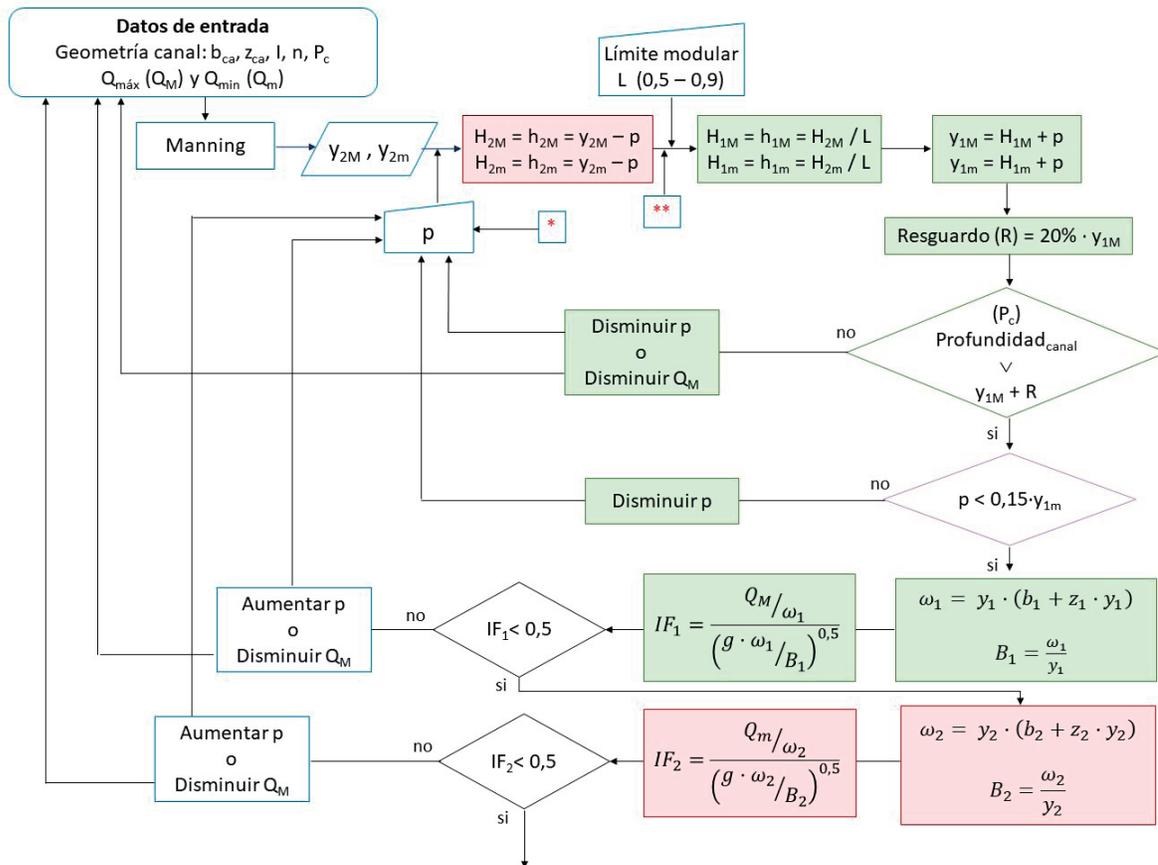


Figura 4. | Diagrama de flujo para el diseño de aforadores modulares de estrechamiento largo (continúa en la página siguiente).

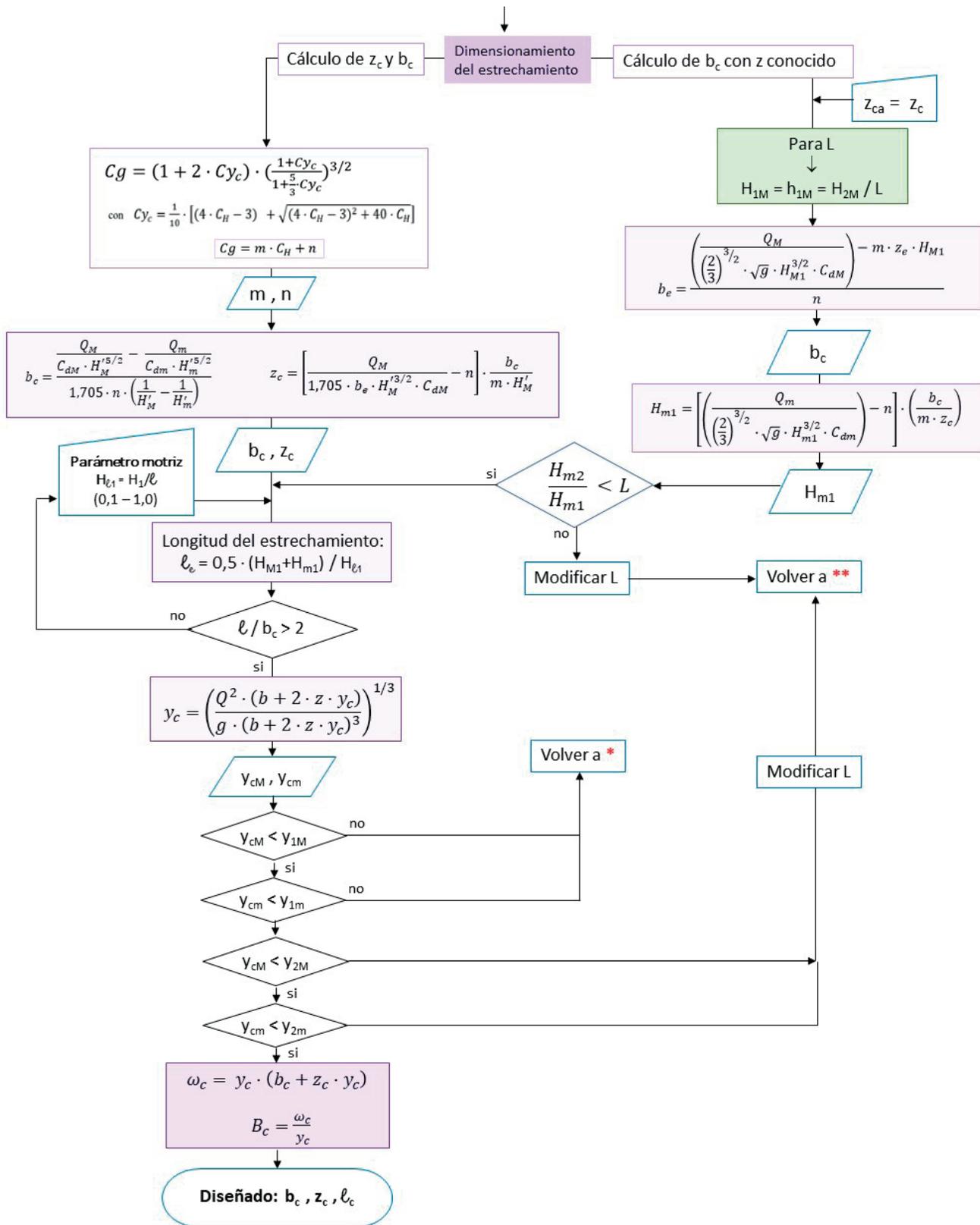


Figura 4. | Diagrama de flujo para el diseño de aforadores modulares de estrechamiento largo (continuación).

A continuación, se calculan b_c y z_c usando las ecuaciones (8') y (9') y se obtiene la longitud del estrechamiento, l , usando (11) de modo que l sea superior al doble de la anchura del estrechamiento, b_c , para garantizar que el régimen uniforme se consiga en la garganta. Por último, se comprueba que con este diseño se alcanza régimen crítico en el estrechamiento. En caso contrario, habría que volver al principio y aumentar p . Para la sección de convergencia se adopta una relación 1:3 y una más suave, 1:6, para la sección de divergencia dado el mayor riesgo de separación de la capa límite.

En el caso de que se adopte que el talud de las paredes del canal se mantiene en la garganta, se procede tal y como se ha indicado en el apartado anterior (ver Figura 4) comprobándose los mismos requisitos de diseño.

La secuencia de cálculo para el diseño de la sección estrechada se inicia con la elección del intervalo de caudales a aforar, en nuestro caso $Q_m=0.02$ y $Q_M=0.05$ m³/s. A continuación, se selecciona un valor del umbral p , que en este ejemplo ha variado entre 0 y 0.015 m, y el límite modular, L , cuya variación se ha fijado entre 0.5 y 0.9, seleccionándose después el parámetro motriz, H/l , cuyo intervalo va de 0.1 a 1.0. El intervalo de caudales no se ha variado en este estudio pues se corresponde con los valores máximo y mínimo que se pretenden aforar en el canal de desagüe de la parcela de arroz. Para cada combinación de p , L y H/l se obtienen los valores de b_c y de z_c que cumplen con todos los requisitos exigidos en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 4. En total, se han diseñado 300 ($6 \times 5 \times 10$) posibles diferentes tamaños de secciones estrechadas en las que se podría alcanzar régimen crítico en la garganta cuando circula un caudal comprendido entre Q_M y Q_m .

Para escenificar los resultados obtenidos se recurre a la representación gráfica. Así, por ejemplo, en la Figura 5 se muestra la relación entre la longitud del estrechamiento, l , y el parámetro motriz, H/l , para $p=0.01$ m y para todos los valores de L .

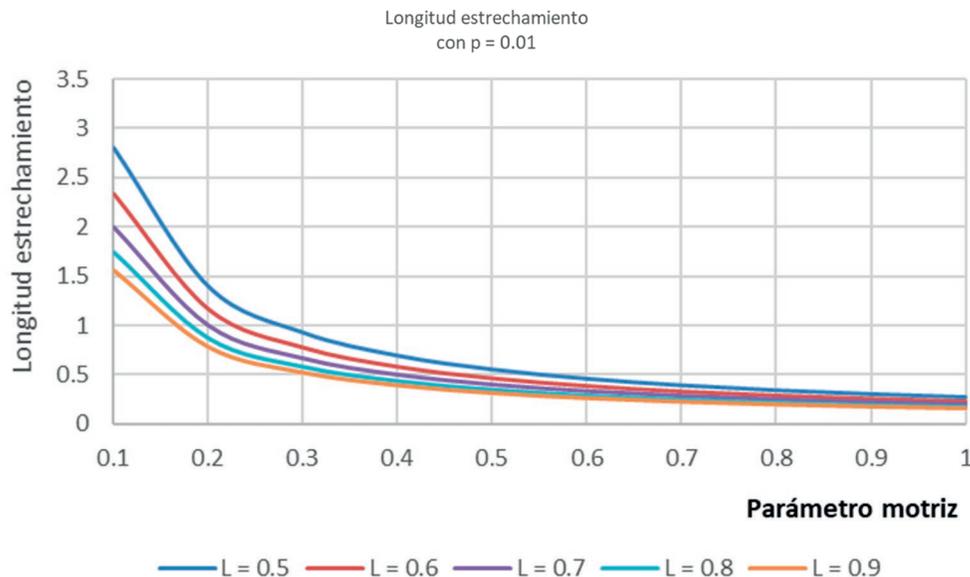


Figura 5. | Relación entre l y H/l para cada valor de L siendo $p=0.01$ m.

Cuanto mayor es L , es decir menores pérdidas de carga, la longitud de la garganta se reduce consecuentemente, aunque a partir de $H/l > 0.5$ dicha longitud permanece prácticamente constante. La influencia de p es escasa, aunque a mayor umbral se reduce la longitud del estrechamiento (no mostrado en esta figura).

En la Figura 6 se muestra la relación entre b_c y H/l para $p=0.01$ m y para todos los valores de L .

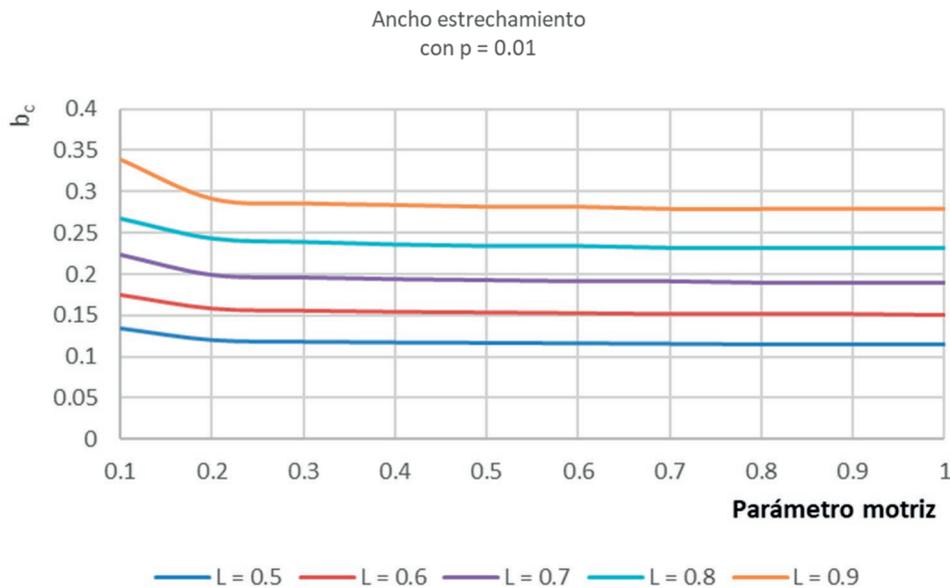


Figura 6. | Relación entre b_c y H/l para cada valor de L y $p=0.01$ m.

Se observa en la Figura 6 que, obviamente, el valor de b_c es mayor conforme aumenta L y que cuando $H/l > 0.2$ b_c disminuye ligeramente, aunque tiende a ser constante. Por debajo de $H/l < 0.2$, la variación de b_c es muy acusada prueba de la falta de uniformidad del flujo. También se ha encontrado que, a mayor p , la dimensión de b_c aumenta (no mostrado en la figura) como es lógico.

La relación entre z_c y H/l se muestra en la Figura 7 para $p=0.01$ m. En este caso, también aparece una gran variación para valores de $H/l < 0.2$, incluso con valores anómalos de z_c para valores de L grandes, y, a partir de ahí, z_c sube y se mantiene prácticamente constante. A mayor L el valor de z_c aumenta lo que supone que la sección se agranda ya que las pérdidas de carga son menores. También se ha encontrado que al aumentar p disminuye, obviamente, el valor de z_c (no mostrado en la figura).

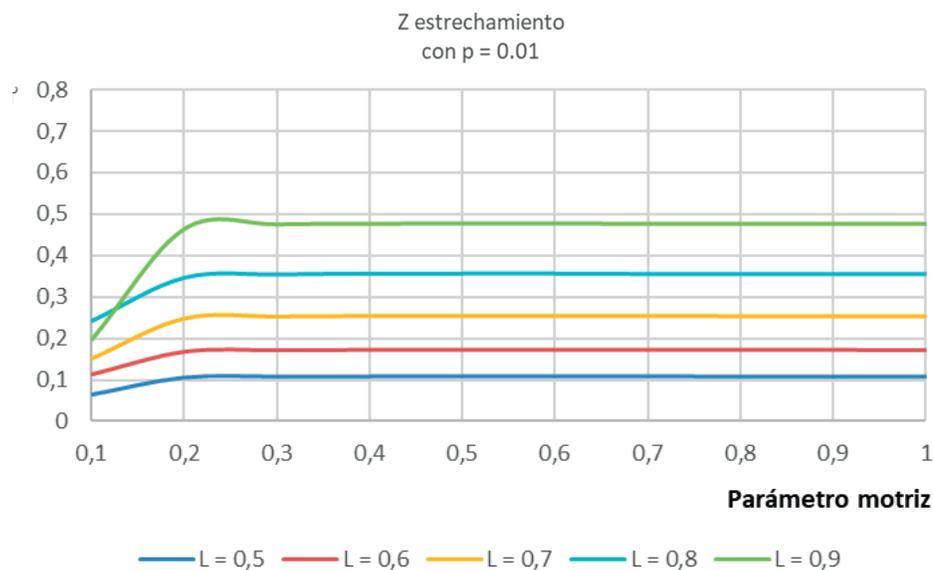


Figura 7. | Relación entre z_c y H/l para cada valor de L y $p=0.01$ m.

El efecto conjunto de b_c , z_c y p se estudia en la Figura 8 donde se muestra la relación entre el área de la sección de la garganta para caudal máximo, w_M , y el límite modular para diferentes valores de H/l siendo $p = 0.01$ m. Se observa que para mayor L aumenta el tamaño de la sección estrechada como era previsible, aunque no hay grandes diferencias al variar H/l cuanto mayor es L . Tampoco se han encontrado grandes diferencias al variar el valor de p (no mostrado en la figura).

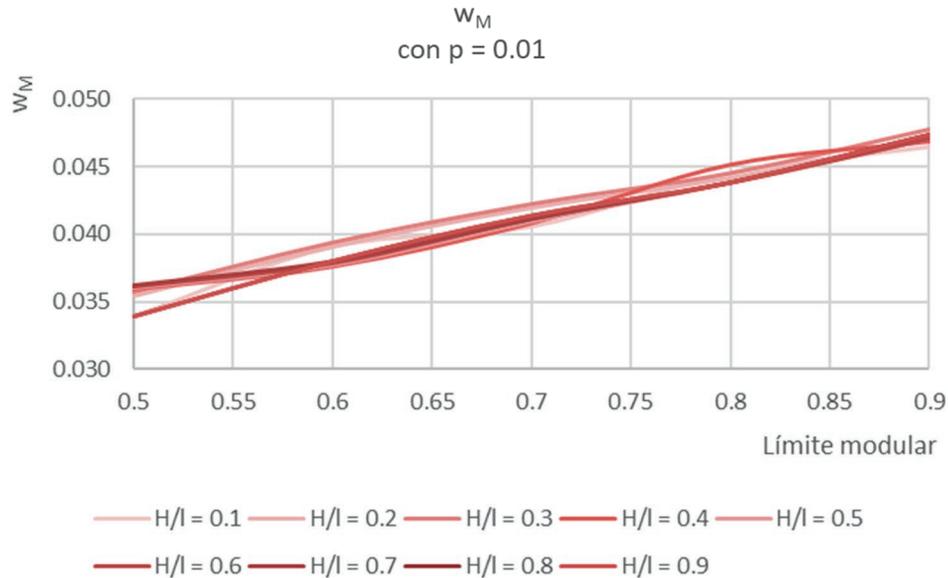


Figura 8. | Relación entre w_M y L para diferentes valores de H/l con $p=0.01$.

Cuando se mantiene el talud del canal en el estrechamiento, $z_c=z_{ca}$, no es posible encontrar una solución factible si $L<0.7$. Cuando $L=0.7$, p debe ser ≥ 0.01 y cuando $L\geq 0.8$, todas las soluciones son diseños posibles. En la Figura 9 se presenta la relación entre b_c y el parámetro motriz, H/l , para diferentes valores de L observándose que el valor de b_c es negativo cuando $L=0.5$ y $L=0.6$ y prácticamente cero cuando $L=0.7$. En todos los casos, b_c disminuye ligeramente al aumentar H/l ya que se requiere una mayor contracción cuando la longitud de la garganta disminuye.

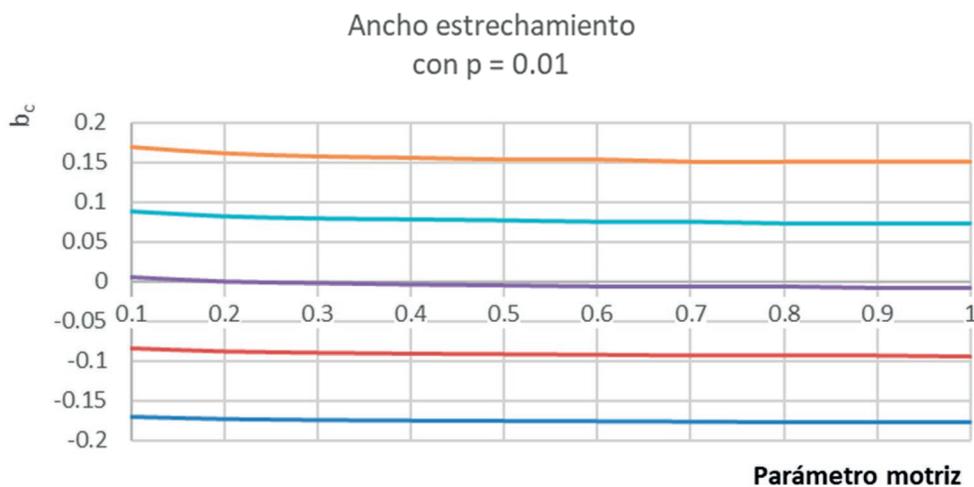


Figura 9. | Relación entre b_c y el parámetro motriz, H/l , para diferentes valores de L con $p=0.01$ m y $z_c=z_{ca}$.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

El objeto final de este trabajo es diseñar un aforador de estrechamiento largo en el caso de la parcela de arroz y del canal que le sirve de desagüe en el proceso de recirculación. Las características de este canal construido en tierra son las siguientes:

Anchura de la base del canal: $b_{ca} = 0.4$ m

Talud de las paredes del canal: $z_{ca} = 1.1798$ ($\theta/2 = 49.72^\circ$)

Pendiente del canal: $I = 0.002$

Coefficiente de aspereza de Manning: $n = 0.025$

Profundidad del canal: 0.89 m

El intervalo de caudales a aforar se ha estimado en función del volumen de agua que entra en la parcela que ha sido medido mediante otros procedimientos, resultando en este caso de:

$Q_m = 0.02$ m³/s

$Q_M = 0.05$ m³/s

Los parámetros de entrada para el diseño, adoptados en función de las características del canal, han sido:

Se adopta un valor elevado para el límite modular ya que no se dispone de una gran caída de carga en el canal:

Límite modular: $L = 0.8$

La altura del umbral se fija en el valor mínimo para que la altura aguas arriba del aforador no sea muy elevada y alcance los tubos que desaguan desde la parcela al canal:

Altura umbral: $p = 0$

La longitud del estrechamiento se adopta fijando un valor para el parámetro motriz H/l que, de acuerdo con los resultados obtenidos, debe ser al menos de 0.5 para garantizar régimen uniforme. Un valor mayor implica solamente mayores pérdidas de carga:

Parámetro motriz: $H/l = 0.5$

Aplicando la hoja de cálculo diseñada resultan las siguientes dimensiones de la sección de control:

Anchura de la base de la garganta: $b_c = 0.18$ m

Talud de las paredes del aforador: $z_c = 0.5317$ ($\theta/2 = 28^\circ$)

En el caso de que el valor resultante de b_c fuera extremadamente pequeño, y no practicable desde el punto de vista constructivo, habría que incrementar el valor del umbral p .

CONCLUSIONES

Se ha propuesto un nuevo diseño analítico de la sección estrechada trapecial de un aforador modular de estrechamiento largo interpuesto en un canal partiendo del intervalo de caudales a aforar y de las propias características del canal.

Un ejemplo ha sido usado para demostrar la precisión del método desarrollado donde la sección de la garganta se ha considerado que es trapecial. No obstante, el procedimiento analítico es el mismo para cualquier forma geométrica de la sección estrechada.

Todos los resultados encontrados tras generar un gran número de secciones del estrechamiento demuestran la fiabilidad del método utilizado. Cada usuario puede elegir el límite modular, así como la elevación de la solera y la longitud del estrechamiento más

acordes a las características del canal donde se va a instalar el aforador, lo que automáticamente les proporcionará las dimensiones de la sección transversal de la garganta.

La coherencia de los resultados obtenidos demuestra la precisión y viabilidad de procedimiento presentado para diseñar la sección de la garganta de un aforador modular de estrechamiento largo.

Todo el proceso ha sido implementado en una hoja de cálculo Excel que permite modificar los datos de entrada y comprobar rápidamente la exactitud de los resultados obtenidos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el soporte recibido del Ministerio de Ciencia e Innovación, a través de la ayuda RTC2019-007133-2 (2020-2023) de la convocatoria de Proyectos de I+D+i «Retos-colaboración 2019», Asimismo, se agradece la colaboración de la Comunidad de Regantes de la Sección II de las Marismas del Guadalquivir. También se agradece el soporte financiero del Ministerio de Ciencia e Innovación, la Agencia Estatal de Investigación, a través del Programa Severo Ochoa y María de Maeztu para Centros y Unidades de Excelencia en I+D (Ref. CEX2019-000968-M).

REFERENCIAS

- Ackers, P., White, W.R., Perkins, J.A., Harrison, A.J.M. 1978. *Weirs and flumes for flow measurement*. John Wiley, New York.
- Bos, M.G (ed). 1978. *Discharge measurement structures*. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Publication n° 20, Wageningen.
- Bos, M.G., Replogle, J.A., Clemmens, A.J. 1984. *Flow measuring flumes for open channel systems*. John Wiley, New York, 321 pp.
- Bautista, E., Schlegel, J.L., Wahl, T.L., Clemmens, A.J., Replogle, J.A. 2020. WinFlume 2.0. *Software for design and calibration of long-throated flumes and broad-crested weirs for open-channel water flow measurement*. Software and user manual. USDA-Agricultural Research Service (Maricopa, AZ) and USDI-Bureau of Reclamation (Denver, CO), USA.
- Domínguez, J., Losada A., Roldán, J., Alcaide, M. 1984. *Curvas de gasto para aforo modular*. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, Madrid, 81 pp.
- Ishfaq, M, Farroq, M., Zulfqar, U., Hussain, S., Akbar, N., Nawaz, A., Anjum, S.A. 2020. Alternate wetting and drying: A water-saving and ecofriendly rice production system. *Agricultural Water Management*, 241: 106363. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106363>
- Parshall, R.L. 1945. *Improving the distribution of water to farmers by use of the Parshall measuring flume*. Soil Conservation Service. Bull. 488. U.S. Department of Agriculture y Colorado Agricultural Experiment Station. Fort Collins, Colorado.
- Vantankhah, A.R., Mahdavi, A. 2012. Simplified procedure for design of long-throated flumes and weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 26: 79-84. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2012.04.007>
- Wahl, T.L., Replogle, J.A., Wahlin, B.T., Higgs, J.A. 2000. New developments in design and application of long-throated flumes. *Joint conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management*. Minneapolis, Minnesota. [https://doi.org/10.1061/40517\(2000\)319](https://doi.org/10.1061/40517(2000)319)
- Wahl, T.L., Clemmens, A.J., Replogle, J.A., Bos, M.G. 2005. Simplified design of flumes and weirs. *Irrigation and Drainage*, 54: 231-247. <https://doi.org/10.1002/ird.160>

GLOSARIO DE SÍMBOLOS USADOS

- b_c : anchura de la base de la sección estrechada (m)
- b_{ca} : anchura de la base del canal (m)
- C_d : coeficiente de gasto
- C_g : coeficiente geométrico o de forma
- C_u : coeficiente de velocidad
- IF_1 : número de Froude en la sección de aproximación del canal
- g : aceleración de la gravedad (m/s^2)
- H/l : parámetro motriz
- H : altura de energía en general (m)
- h : altura limnimétrica aguas arriba del aforador (m)
- H'_M : altura de energía bajo el supuesto de fluido perfecto circulando Q_M (m)
- H'_m : altura de energía bajo el supuesto de fluido perfecto circulando Q_m (m)
- H_0 : energía específica (m)
- H_1 : altura de energía aguas arriba del aforador (m)
- H_2/H_1 : relación de sumergencia
- H_2 : altura de energía aguas abajo del aforador (m)
- H_c : altura de energía crítica en la sección estrechada o de control (m)
- H_M : altura de energía aguas arriba del aforador en el caso de fluido real circulando Q_M (m)
- H_m : altura de energía aguas arriba del aforador en el caso de fluido real circulando Q_m (m)
- H_n : nuevo valor de la altura de energía en el proceso iterativo de cálculo del caudal
- I : pendiente de la solera del canal
- L : límite modular
- l : longitud del estrechamiento (m)
- m, n : coeficientes de ajuste de la recta de regresión $C_g(C_H)$
- n : coeficiente de aspereza de Manning
- p : altura del umbral en la sección estrechada (m)
- p_c : profundidad del canal (m)
- Q : caudal circulante por el canal en general (m^3/s)
- Q' : nuevo valor del caudal en el proceso iterativo de su cálculo (m^3/s)
- Q_M : caudal máximo a aforar (m^3/s)
- Q_m : caudal mínimo a aforar (m^3/s)
- R : radio hidráulico del canal (m)

R_a : coeficiente auxiliar en el cálculo de C_u

U_1 : velocidad en la sección de aproximación del canal (m/s)

U_c : velocidad crítica en la sección estrechada o de control

y_1 : calado en la sección aguas arriba o de aproximación al aforador (m)

y_{1M} : calado aguas arriba del aforador cuando circula Q_M

y_{1m} : calado aguas arriba del aforador cuando circula Q_m

y_2 : calado en la sección aguas abajo del aforador (m)

y_{2M} : calado aguas abajo del aforador cuando circula Q_M

y_{2m} : calado aguas abajo del aforador cuando circula Q_m

y_c : calado crítico en la sección estrechada o de control (m)

z_c : talud de las paredes en la sección estrechada

z_{ca} : talud de las paredes del canal $=\tan(\theta/2)$

ΔH : pérdida de energía a través del aforador (m)

$\theta/2$: ángulo de inclinación de la pared del canal

ω : área de la sección transversal del canal (m²)

ω_1 : área de la sección de aproximación al aforador (m²)

ω_M : área de la sección de la garganta cuando circula Q_M (m²)

SUBÍNDICES

1: aguas arriba del aforador

2: aguas abajo del aforador

c: sección de control o estrechada

M: circula el caudal máximo

m: circula el caudal mínimo.