



Manual de diseño y guía de cálculo de canales escalonados (disipadores de energía) para obras propuestas o existentes que se encuentren comprometidas por corrientes de agua, a fin de disminuir la energía en las zonas descarga y evitar socavación.

Valentina Arbelaez García

Informe de práctica para optar al título de Ingeniera Civil

Asesores

Nora Elena Villegas Jiménez, Magíster (MSc) en Ingeniería Ambiental

Aurelio Gómez González, Magíster (MSc) en Ingeniería Ambiental y Especialista (Esp) en Hidrología Subterránea.

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil
Medellín, Antioquia, Colombia
2022

Cita	(Arbelaez, 2022)
Referencia	Arbelaez García, V., (2022). <i>Manual de diseño y guía de cálculo de canales escalonados (disipadores de energía) para obras propuestas o existentes que se encuentren comprometidas por corrientes de agua, a fin de disminuir la energía en las zonas de descarga y evitar socavación</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Claudia Helena Muñoz Hoyos.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
1. Objetivos	13
1.1. Objetivo general	13
1.2. Objetivos específicos.....	13
2. Marco teórico.....	14
2.1. Disipador de energía.....	14
2.2. Algunos tipos de disipadores de energía	14
• Canal de rápidas lisas	14
• Canal de pantallas deflectoras (CPD).....	15
• Canal de Rápidas con Tapa y Columpio (CRTC)	16
• Estanques amortiguadores	16
• Amortiguador de impacto.....	17
• Canal escalonado	18
• Flujo saltante.....	19
• Flujo rasante.....	20
• Flujo de transición.....	20
2.3. Ecuación de Manning	20
3. Metodología.....	22
3.1. Metodología descriptiva	22
Selección del tema o proyecto	22
3.2. Metodología retrospectiva.....	22
Recopilación y procesamiento de información.....	22
3.3. Metodología prospectiva	23
Elaboración de memorias de cálculo y manuales	23

3.4. Metodología unificada.....	28
4. Resultados.....	32
5. Conclusiones.....	35
Referencias bibliográficas	37
Anexos.....	38

Lista de tablas

Tabla 1.....	33
Tabla 2.....	33
Tabla 3.....	34
Tabla 4.....	34

Lista de figuras

Figura 1 Detalle del modelo en planta y perfil del amortiguador de impacto.....	17
Figura 2 Diseño metodológico para el cálculo de canales escalonados (disipadores de energía). Parte I.....	25
Figura 3 Diseño metodológico para el cálculo de canales escalonados (disipadores de energía). Parte II.....	26
Figura 4 Diseño metodológico para el cálculo de canales escalonados (disipadores de energía). Parte III.....	27
Figura 5 Guía aplicación para el cálculo de canales escalonados (disipadores de energía). Parte I.....	38
Figura 6 Guía aplicación para el cálculo de canales escalonados (disipadores de energía). Parte II.....	39
Figura 7 Guía aplicación para el cálculo de canales escalonados (disipadores de energía). Parte III.....	39
Figura 8 Gráfica clasificación de las condiciones de flujo - Caso 4.....	40

Lista de fotografías

Fotografía 1 18

Fotografía 2 19

Fotografía 3 19

Siglas, acrónimos y abreviaturas

b	Ancho del canal
C_e	Concentración media de aire
d	Profundidad de agua clara medida de forma perpendicular a la pendiente del canal.
g	Gravedad
h	Altura o contrahuella de escalón
H_{muros}	Altura de muros del canal
l	Longitud o huella de escalón
n	Coefficiente de rugosidad de Manning
P	Perímetro mojado
Q	Caudal de diseño
R	Radio hidráulico
RH	Resalto hidráulico
S₀	Pendiente del canal
Tr	Periodo de retorno
V	Velocidad media del flujo al interior del canal
y_c	Profundidad crítica del flujo
y₉₀	Profundidad donde la concentración de aire local es del 90% (Profundidad normal)
z	Taludes del canal

Resumen

El incremento acelerado en el desarrollo urbano al igual que la generación de proyectos de infraestructura a nivel nacional con el fin de dinamizar el empleo, la inversión y la competitividad, requieren de obras hidráulicas que permitan un buen funcionamiento de la estructura y garanticen seguridad tanto de la obra como de las personas que hacen uso de esta, sobre todo porque la gran mayoría intervienen zonas montañosas. Bajo este escenario se requiere la construcción de obras hidráulicas que capten, conduzcan y entreguen de forma segura el agua que escurre por las laderas, evitando que se generen erosión y afectaciones en los diferentes elementos que componen el entorno, ya sea obras, cauces entre otros.

Por lo anterior como un aporte desde la academia en convenio con la empresa HIDRYCAS S.A.S, se planteó el objetivo de realizar un manual y guía de cálculo para el diseño de canales escalonados que sirva como apoyo en diversos proyectos a usuarios afines con el área de la hidrología y la hidráulica, planteando una metodología amigable y dinámica para facilitar la toma de decisiones donde se indica paso a paso las fórmulas, variables y parámetros que se deben tomar en cuenta para el diseño de canales escalonados. Durante el desarrollo se pudo observar la influencia de las dimensiones geométricas como altura de escalón y ancho del canal en el comportamiento del flujo al interior del canal y las bondades en cuanto a la disipación de energía de este tipo de obras. En relación con los resultados se pudo concluir que el régimen de flujo rasante es el más recomendado para el diseño de los canales escalonados no solo por la disipación de energía que se brinda a lo largo de todo el canal sino porque se genera en condiciones de alta pendiente y evita que se produzca riegos de cargas hidráulicas máximas e inestabilidades hidrodinámicas.

Palabras clave: canal escalonado, flujo rasante, disipadores de energía, régimen de flujo, hidráulica.

Abstract

The accelerated increase in urban development as well as the generation of infrastructure projects at the national level in order to stimulate employment, investment and competitiveness, require hydraulic works that allow a good functioning of the structure and guarantee safety of both the work and the people who make use of it, especially since the vast majority are involved in mountainous areas. Under this scenario, the construction of hydraulic works that capture, conduct and safely deliver the water that runs down the slopes is required, preventing erosion and damage to the different elements that make up the environment, whether works, channels, among others.

Due to the above, as a contribution from the academy in agreement with the company HIDRYCAS SAS, the objective of making a manual and calculation guide for the design of stepped channels that serves as support in various projects for users related to the area of hydrology and hydraulics, proposing a friendly and dynamic methodology to facilitate decision making where the formulas, variables and parameters that must be taken into account for the design of stepped channels are indicated step by step. During the development, it was possible to observe the influence of geometric dimensions such as step height and channel width on the behavior of the flow inside the channel and the benefits in terms of energy dissipation of this type of works. In relation to the results, it was possible to conclude that the grazing flow regime is the most recommended for the design of stepped channels, not only because of the energy dissipation that is provided throughout the entire channel, but also because it is generated in conditions of high slope and prevents risk of maximum hydraulic loads and hydrodynamic instabilities from occurring.

Keywords: stepped chutes, skimming flow, energy dissipators, flow regime, hydraulics.

Introducción

La construcción en la periferia de las ciudades, sobre todo en aquellas que poseen un relieve montañoso y como consecuencia la ausencia de control de los torrentes, las malas prácticas agrícolas, la deforestación, el manejo poco apropiado o insuficiente de las aguas de infiltración y de escorrentía (en especial el retorno de estas al subsuelo), son algunas de las actividades antrópicas que generan afectaciones en el ciclo del agua desatando procesos erosivos, los cuales si no se intervienen a tiempo y se tratan de manera correcta, pueden ocasionar mayores daños como alteración de la infraestructura o pérdida total de la misma, obstrucción de los sistemas de drenaje por alta carga de sedimentos, deslizamientos, entre otros. Estas circunstancias justifican entonces el diseño y la construcción de obras hidráulicas que capten, conduzcan y entreguen el agua que escurre por las laderas, disipando la energía y evitando la erosión (Fernández,2010).

La mayoría de las investigaciones especializadas en el tema de disipadores de energía se han enfocado en estructuras que regulen la energía en presas, obras de captación o aliviaderos, de manera que no se vean comprometidas ninguna de las obras por los efectos de erosión que pueda ocasionar el agua al momento de la descarga (Pardo et al.,2017); particularmente las estructuras escalonadas (disipadores de energía), han sido implementadas principalmente en presas de concreto compactadas con rodillo-CCR (Llano 2003). Recientemente en Colombia ha habido un aumento en la construcción de canales escalonados para la construcción de vías y la canalización de drenajes naturales sobre todo cuando se intervienen zonas de alta montaña. No obstante, las investigaciones existentes respecto al diseño de este tipo de disipadores no son muy conocidas y no se tienen recomendaciones claras y definitivas para su diseño. (Rosado,2017).

Dicho lo anterior, se plantea la realización de un Manual de diseño y guía de cálculo de canales escalonados (disipadores de energía), para obras de drenaje urbano que se encuentren comprometidas por corrientes de agua debido a la alta pendiente y canalización de drenajes naturales, y en general para cualquier zona que requiera disminuir la energía cinética del agua en los puntos de descarga con el fin de evitar socavación.

Para ello se lleva a cabo una revisión bibliográfica de diversos autores que han investigado acerca del tema de disipadores de energía, y se evalúa cuales metodologías se adaptan mejor a la topografía predominante del Departamento de Antioquia (montañosa), en aras de que pueda ser aplicable en general a zonas de alta pendiente.

La empresa Hídrycas S.A.S es una organización cuyo objetivo principal es el ejercicio de las ingenierías Civil, Sanitaria, Ambiental, y demás ingenierías afines; la cual desarrolla actividades en proyectos de consultoría, interventoría, construcción y comercialización, brindando servicios especializados de calidad y soluciones innovadoras, bajo el concepto de desarrollo sostenible, respetando las comunidades, el medio ambiente y las leyes vigentes.

El proyecto se llevó a cabo con el apoyo y orientación de profesionales al interior de la empresa así mismo como de la asesora asignada. Ya que el fuerte de la empresa es hidrología, hidráulica y socavación, también se reunirá información, observaciones y resultados de otros proyectos realizados, para la conformación del manual.

El presente informe contiene los objetivos, una revisión bibliográfica sobre la cual se sustenta la información presentada, la metodología llevada a cabo para la elaboración del manual y las memorias de cálculo, un caso ejemplo donde se muestra la aplicabilidad de dicha metodología, y finalmente las conclusiones y recomendaciones del caso.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Elaborar un manual de diseño y una guía de cálculo de canales disipadores de energía, del tipo canal escalonado como una ayuda de diseño hidráulico en diversos proyectos para usuarios afines al área de hidrología e hidráulica.

1.2. Objetivos específicos

- Construir un estado del arte concerniente al tema de disipadores de energía, con un enfoque en los canales escalonados.
- Elaborar la guía de cálculo de canales escalonados, mediante una hoja de cálculo, que incluya parámetros de diseño como: caudal y dimensiones geométricas, que permitan obtener como resultado todas las variables que caracterizan a un flujo dentro de un canal y el régimen particular de los canales escalonados que puede ser: flujo rasante, flujo saltante o flujo en transición.
- Obtener la rugosidad equivalente mediante la ecuación de Manning considerando la profundidad de flujo de canal escalonado (y_{90}) como y_{normal} , los datos geométricos del canal y el pseudo-fondo de este que pase por las aristas de los escalones como si estos no existieran.¹

¹ Aunque la disipación de energía no depende de la calidad del material en que se construye el canal, es claro que debe ser un material que sea resistente al desgaste y a la erosión.

2. Marco teórico

2.1. Disipador de energía

Hidráulicamente el uso de un disipador de energía se puede definir como el cambio abrupto de un régimen de flujo supercrítico a uno subcrítico, de aquí se deriva la importancia de la determinación no solo de las dimensiones que tendrá el disipador, sino también la ubicación a nivel (cota) conveniente, de manera que se permita el desarrollo del comportamiento del flujo mencionado y se llegue a una correcta disipación de energía (Pardo et al.,2017).

El objetivo real en este tipo de estructuras es conseguir que la velocidad del flujo en la descarga no produzca procesos de erosión que comprometan la estabilidad de las estructuras o de los taludes, de igual manera que si se entrega a un cauce natural no altere las condiciones de este. La disipación de la energía cinética se puede obtener por diferentes medios, entre ellos: el incremento de la rugosidad del material del cual se hará el disipador, la generación de un resalto hidráulico, disipación de energía por impacto del flujo (Rosado,2017).

Los disipadores de energía se ubican en forma normal a la dirección del flujo y en algunas ocasiones (cuando se requiere), se complementan con estructuras de captación, manejo de aguas de escorrentía y vegetación. Estas estructuras captan y entregan de forma regulada el agua a los cauces naturales (Fernández,2010).

Los parámetros que intervienen en un disipador de energía para que este cumpla con su objetivo principal son:

- Un cambio en el régimen del flujo de supercrítico a subcrítico lo cual implica la formación de un resalto hidráulico.
- Aumento en la rugosidad del canal
- Impacto del flujo generado por obstáculos dentro del canal.

2.2. Algunos tipos de disipadores de energía

- *Canal de rápidas lisas*

Son canales de fondo liso cuya pendiente se adecua a las condiciones topográficas del terreno y al caudal de diseño. En este tipo de canales aun cuando se emplean materiales muy

rugosos para su construcción, el agua fluye a una velocidad significativa llegando al pie de la ladera o talud aun con mucha energía cinética, de modo que se requieren estructuras adicionales ubicadas en la descarga del canal que permitan disipar dicha energía para no erosionar el lecho o las márgenes del cauce receptor, ni la misma estructura de entrega; este tipo de estructuras suelen ser estanques amortiguadores de impacto con dentellones o bloques.

Su diseño está en función principalmente de: el caudal de diseño, el material a utilizar en su construcción, la pendiente del terreno y las características geométricas elegidas para el canal.

De acuerdo con el material a utilizar, garantiza buena resistencia frente a velocidades entre 3 m/s y 20m/s (Fernández,2010).

- ***Canal de pantallas deflectoras (CPD)***

“Es un canal de sección rectangular y fondo liso que incluye pantallas deflectoras alternas colocadas a 45° con el eje del canal, las cuales sirven como elementos disipadores de energía, y pestañas longitudinales sobre los bordes de ambas paredes del canal que impiden que la estructura rebose” (Fernandez,2010).

Las pantallas deflectoras desplazan el flujo lateralmente reduciendo la velocidad del flujo cuando se trata de un caudal pequeño, de manera que no sobrepase la altura de las pantallas; cuando el caudal es mayor y sobrepasa la pantalla, funcionan como elementos rugosos que van disipando la energía en el fondo del canal.

El CPD es válido para pendientes entre el 10% y el 50%, evita grandes velocidades y entrega el flujo con energía disipada sin importar la longitud del canal y la diferencia de cotas entre la entrada y la salida de este.

Puede conservar casi constante su capacidad incluso al variar la pendiente dentro de un amplio rango, y por tal motivo puede adaptarse a las sinuosidades del terreno sin tener que variar su sección ni requerir excavaciones excesivas para su construcción.

Su diseño permite que haya una autolimpieza del canal al no haber zonas de estancamiento donde pueda presentarse sedimentación (Ramirez,1978).²

² Presentan disipación de energía dentro del canal por lo que en la mayoría de las ocasiones no se requieren estructuras disipadoras especiales a la entra o a la salida del canal.

- ***Canal de Rápidas con Tapa y Columpio (CRTC)***

Canal apto para pendientes altas o muy altas entre el 50% y el 173%; está conformado por tramos de fondo liso con sección rectangular que se interrumpen cada cierto tramo de manera que, en la transición de un segmento liso a otro, se tiene un columpio que deflecta el chorro y lo proyecta contra una tapa ubicada en el inicio del siguiente tramo liso aguas abajo. Este sistema columpio-tapa se complementa por un deflector al final de la tapa que obliga al flujo a volver al canal. La gran mayoría de energía se disipa en el módulo columpio-tapa llegando al pie de la ladera o talud con un porcentaje de energía muy bajo.

Dentro de sus principales características también están que se puede complementar con el Canal de Pantallas Deflectoras, evita la presencia de obstáculos en el flujo, tiene gran capacidad de descarga a pesar de la fuerte pendiente y esta capacidad tiende a ser constante a lo largo de todo el canal, es de fácil mantenimiento y economía y facilidad de construcción, entre otras (Fernandez,2010).²

- ***Estanques amortiguadores***

Como lo define French (1988), un estanque amortiguador es un tramo corto de canal ubicado al final de un vertedero o de cualquier otra estructura que produzca flujo supercrítico. El estanque amortiguador es una estructura que disipa la energía por medio de la ocurrencia de un resalto hidráulico donde, la estructura además de soportar los efectos que provoca el resalto sobre el elemento en el que se desarrolla, garantiza que se logre la máxima eficiencia de este y que se genere dentro de la estructura misma (Pardo 2017).

A este tipo de disipador se incorporan distintos accesorios como dientes deflectores, dados amortiguadores y umbral final con dos propósitos: incrementar la disipación de energía y favorecer la estabilización del resalto dentro del estanque para que no se salga de este.

Las velocidades a la entrada de este disipador requieren ser de bajas a moderadas (hasta 15-18 m/s) y descargas menores a 5.7 m³/s para evitar que se presente cavitación en la cara posterior de los dados amortiguadores.

El diseño de los estanques amortiguadores se basa según el tipo de resalto hidráulico y está en función del número de Froude (Peterka 1984).³

³ Estructuras que disipan energía a la entrada o a la salida del canal y no a lo largo del mismo.

- **Amortiguador de impacto**

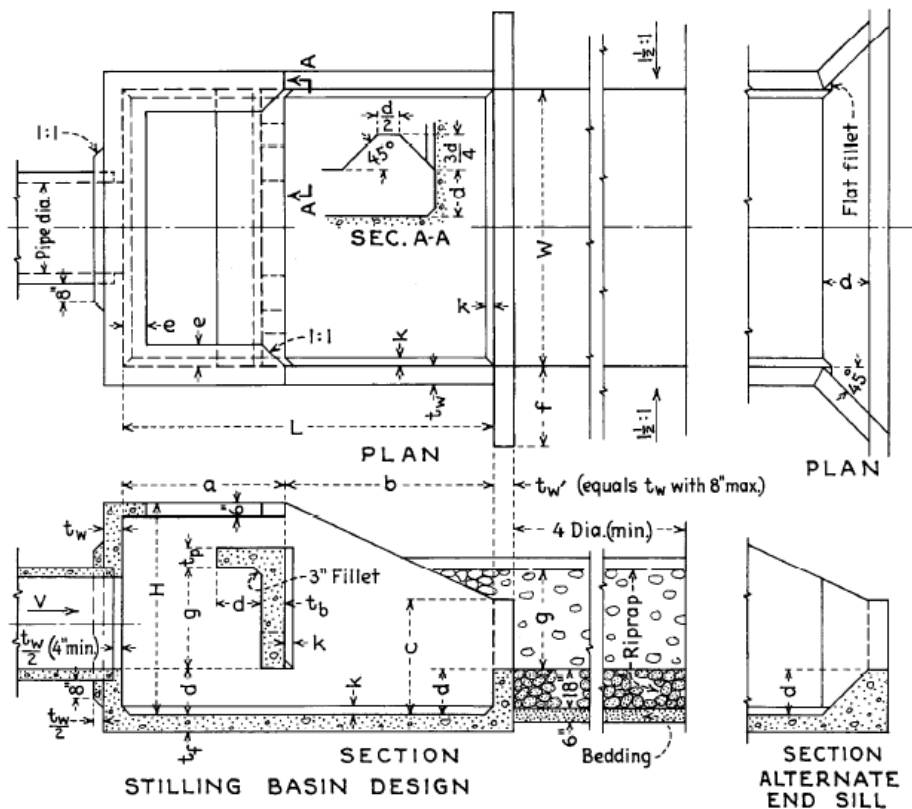
Como su nombre lo indica, la principal característica de este dissipador es el impacto que tiene lugar entre la salida del canal y un muro de hormigón contenido en una estructura relativamente pequeña en forma de caja; para su diseño este dissipador no requiere una profundidad determinada aguas abajo de la descarga para un desempeño exitoso (Peterka 1984). Su objetivo central es eliminar gran parte de la energía de los flujos con altas velocidades por medio de fricción del agua con el aire, difusión dentro del estanque de amortiguación con el muro dissipador. De esta manera se reduce la erosión en el cauce receptor y se garantiza una restitución del flujo al régimen más estable posible (Pardo y Alegret 2012).

Es importante resaltar que la eficiencia de este amortiguador para lograr pérdidas de energía es mayor que un resalto hidráulico del mismo número de Froude.

El diseño de este dissipador aplica para caudales de hasta $10 \text{ m}^3/\text{s}$ y velocidades de 9 m/s . Mayores caudales pueden ser considerados si se ubican en paralelo varios dissipadores. (Peterka 1984).³

Figura 1

Detalle del modelo en planta y perfil del amortiguador de impacto



Nota. Fuente USBR & Peterka (1984).

- ***Canal escalonado***

Son canales con gradas o escalones donde la energía se disipa desde el comienzo, es decir, a la vez que se conduce el agua, se va disipando la energía cinética del flujo por impacto con los escalones, llegando el agua al final del canal con energía disipada, por lo que no se requieren estructuras adicionales, o, dado el caso, una estructura pequeña (Fernández, 2010).

Algunas de las ventajas identificadas en los canales escalonados son: facilidad constructiva, bajos costos constructivos, altas tasas de disipación de energía con relación a un canal de fondo plano, fácil inspección del canal cuando requiera mantenimiento, permite adecuarse fácilmente a la pendiente del terreno, entre otras.

Las condiciones de flujo en las estructuras escalonadas están relacionadas principalmente con la geometría del escalón y el caudal transportado. Las investigaciones han mostrado que el flujo en un canal escalonado se puede dividir en tres regímenes: flujo saltante, flujo de rasante y flujo de transición (fase intermedia entre los dos primeros) (Llano, 2003).²

Fotografía 1

Canales de recolección de aguas lluvias en la subestación del proyecto hidroeléctrico Porce III



Nota. Fuente suministrado por Ing. Aurelio Gómez

Fotografía 2

Canalización quebrada La Presidenta (Medellín)



Nota. Fuente Rosado, G. (2017). Metodología para el diseño de canales escalonados, disipadores de energía, empleados en drenaje urbano, basada en modelación física. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente

Fotografía 3

Canal escalonado en la Escombrera San Javier



Nota. Fuente suministrado por Ing. Aurelio Gómez

- **Flujo saltante.** El régimen de flujo saltante se define por una sucesión de chorros en caída libre. El agua de cada escalón golpea el escalón de abajo como una serie de

zambullidas. La disipación de energía se consigue de tres formas: ruptura del chorro en el aire, impacto del chorro y mezcla en el escalón con la formación de un salto hidráulico parcial o totalmente desarrollado (Llano, 2003). Si el flujo al caer no logra quedar sobre la huella del escalón, comenzará a caer de manera desordenada sobre los escalones, llegando, en algunos casos, a no impactar al más próximo. (Rosado, 2017).

El régimen de flujo saltante normalmente ocurre para descargas bajas y pendientes planas, por lo que a menudo no es práctico para aplicaciones de ingeniería. Es un régimen de flujo apropiado para aliviaderos, arroyos y canales escalonados relativamente planos con pendientes suaves. (Llano, 2003).

Existen tres tipos de flujos saltante: con resalto hidráulico totalmente desarrollado, con resalto hidráulico parcialmente desarrollado y sin resalto hidráulico.

- **Flujo rasante.** Para descargas más altas o un aumento suficiente en la pendiente del canal, el agua fluye como una corriente estable que pasa sobre el pseudo-fondo formado por los bordes externos de los escalones. Debajo de esto, se desarrollan vórtices de recirculación mantenidos a través de la transmisión del esfuerzo cortante del agua que fluye sobre el borde de los escalones, logrando la disipación de energía del flujo (Llano, 2003).

- **Flujo de transición.** Una piscina de aguas de recirculación caracteriza el flujo de transición y a menudo una cavidad de aire muy pequeña aparece en algunos escalones y desaparece en otros, dando una apariencia que no es acorde al flujo rasante pero tampoco al flujo saltante. Bajo este tipo de flujo se observa un rocío significativo junto con la desviación del agua y el patrón exhibe considerables variaciones longitudinales de las propiedades del flujo en cada paso, dando un aspecto caótico a lo largo del canal (Llano, 2003).

El comportamiento que adquiera el flujo dentro de los regímenes mencionados va a depender de la altura óptima del escalón, la cual se define como una función del caudal y de la pendiente del canal para obtener el régimen de flujo seleccionado (saltante o rasante) y el nivel apropiado de disipación de energía (Fernández, 1998).

2.3. Ecuación de Manning

La rugosidad que se presenta en las paredes y el fondo de la sección transversal de los canales además de ser variada está influida tanto espacial como temporalmente por agentes como basuras, vegetación, sedimentación, erosión y obstrucciones en general. Por tal motivo

determinar la rugosidad de las superficies no es tarea fácil (Duarte 2009). En 1889 el ingeniero Robert Manning presentó la siguiente ecuación:

$$V = \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{n} \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde:

V: velocidad media en m/s

R: radio hidráulico en m

S: pendiente de la línea de energía

n: coeficiente de rugosidad de Manning

“Debido a la simplicidad de su forma y a los resultados satisfactorios que arroja en aplicaciones prácticas, la ecuación de Manning se ha convertido en la más utilizada de todas las ecuaciones de flujo uniforme para cálculos de flujos de canales abiertos” (Chow, 1994, p. 97)

3. Metodología

En busca de cumplir con los objetivos planteados al comienzo de este trabajo, a continuación, se plantea el diseño metodológico implementado y se describen las actividades para la realización del manual de diseño y la guía de cálculo de canales escalonados (disipadores de energía):

3.1. Metodología descriptiva

Selección del tema o proyecto

Como actividad inicial se realizó una caracterización de los proyectos que la empresa Hidrycas S.A.S venía desarrollando, considerando el enfoque ingenieril de la misma y cómo desde la práctica académica era posible realizar una contribución al convenio *Hidrycas S.A.S - Universidad de Antioquia* que permitiera aplicar los conocimientos aprendidos en la Universidad y adquirir nuevos con el apoyo y la orientación de los profesionales al interior de la empresa.

De esta manera se seleccionó un tema común a varios de los proyectos llevados a cabo por la empresa, el cual corresponde al diseño de canales escalonados para obras de drenaje en proyectos de infraestructura que se encuentren comprometidas por corrientes de agua debido a la alta pendiente y, canalización de drenajes naturales; orientado a la elaboración de un manual de diseño y guía de cálculo que permita establecer paso a paso el diseño de este tipo de disipadores de energía, apoyado en gran parte en la metodología usada por el autor Sergio Llano en su tesis *Hydraulics of Stepped Structures- Importance of Flow Regimes on Stepped Chutes and Practical Application in Developing Countries*.

3.2. Metodología retrospectiva

Recopilación y procesamiento de información

- Se realizó una revisión de criterios y conceptos fundamentales de las disciplinas como hidráulica, hidrología, mecánica de suelos, socavación, entre otros, que fundamentan el diseño de los disipadores de energía en canales abiertos.

- Se efectuaron algunas visitas de campo para el levantamiento de información básica que contribuyera a dar inicio a los proyectos relacionados con el tema escogido; a continuación, se muestran algunos de los ítems requeridos:

- Identificación de las condiciones existentes de la zona a intervenir, sea el cauce de una quebrada o la recepción de un alcantarillado, entre otros, para el posterior trazado de las obras propuestas.
- Verificación de los permisos ambientales requeridos para la implementación de las obras proyectadas.
- Localización de viviendas, caseríos, zonas de pastoreo, especies nativas de fauna y flora y en general, cualquier uso del suelo que pueda verse afectado por la ejecución del proyecto.
- Identificación de obras existentes y determinación de su influencia e interacción con la implementación de las obras a diseñar.

- Revisión de la información hidrológica disponible de los sistemas implicados o realización del estudio hidrológico respectivo, según sea el caso, para la determinación de los caudales de crecientes asociados a diferentes períodos de retorno de la corriente en estudio.

- Evaluación de la necesidad del diseño de obras de disipación adicionales que se requieran para garantizar un adecuado desempeño de los canales escalonados, como lo son: estanques amortiguadores del tipo de impacto, enrocados de protección, dientes deflectores, dados amortiguadores, entre otros.

3.3. Metodología prospectiva

Elaboración de memorias de cálculo y manuales

3.3.1. Se elaboraron las memorias de cálculo donde se establecieron los parámetros de diseño necesarios para la aplicación de las metodologías y conceptos teóricos aportados por la literatura en el diseño de los canales escalonados.

-
- 3.3.2. Una vez realizadas las memorias de cálculo se acompañó en el diseño de los planos constructivos, donde se reflejó el trazado de los canales escalonados y demás obras propuestas considerando la topografía, normatividad vigente y los parámetros de diseño obtenidos en los cálculos.
- 3.3.3. Se planteó el proceso para llevar el canal escalonado al modelo en el *software* HEC-RAS (en los proyectos donde esto aplicaba) considerando la hidráulica bajo la cual está diseñado dicho software, los datos básicos de entrada requeridos y las hipótesis adoptadas, con el fin de obtener un modelo lo más acertado posible al comportamiento real esperado.
- 3.3.4. Se llevó a cabo el análisis de los resultados obtenidos y posteriormente se elaboró el manual de diseño el cual se representó por medio de un diagrama de flujo (Ver Figura 2, Figura 3 y Figura 4) en el que se presentan los pasos a seguir para el diseño del canal escalonado y cada uno de los parámetros, variables y formulas necesarias; adicionalmente se presenta una descripción de cada paso con las consideraciones pertinentes que debe tomar en cuenta el diseñador para obtener un resultado satisfactorio.

Figura 2

Diseño metodológico para el cálculo de canales escalonados (disipadores de energía). Parte I

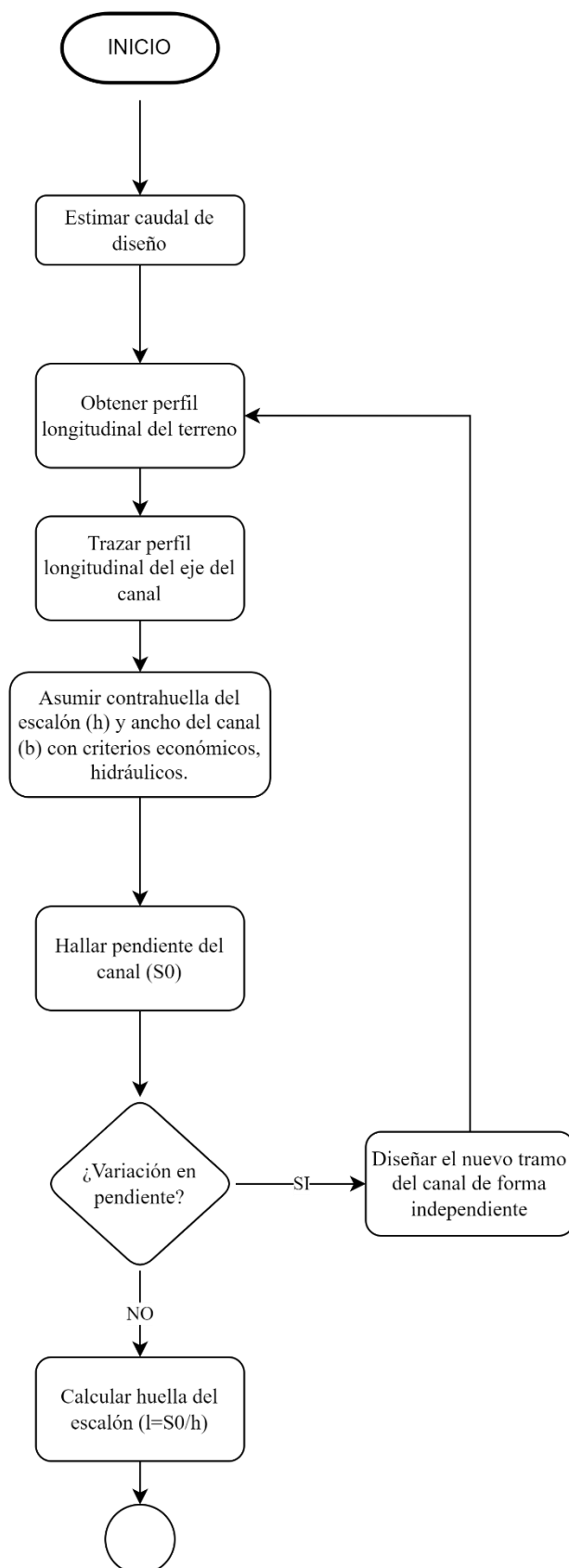


Figura 3

Diseño metodológico para el cálculo de canales escalonados (disipadores de energía). Parte II

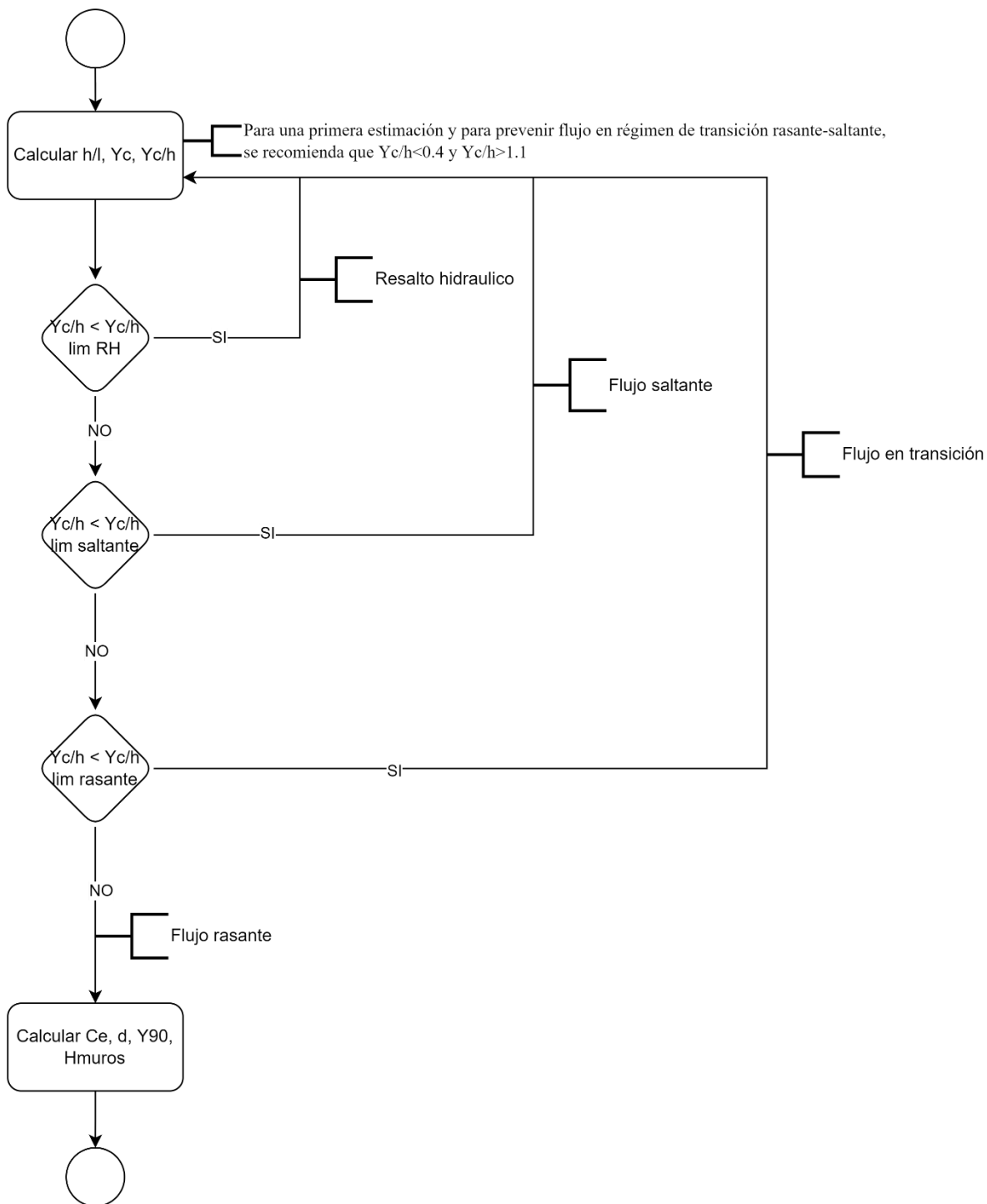
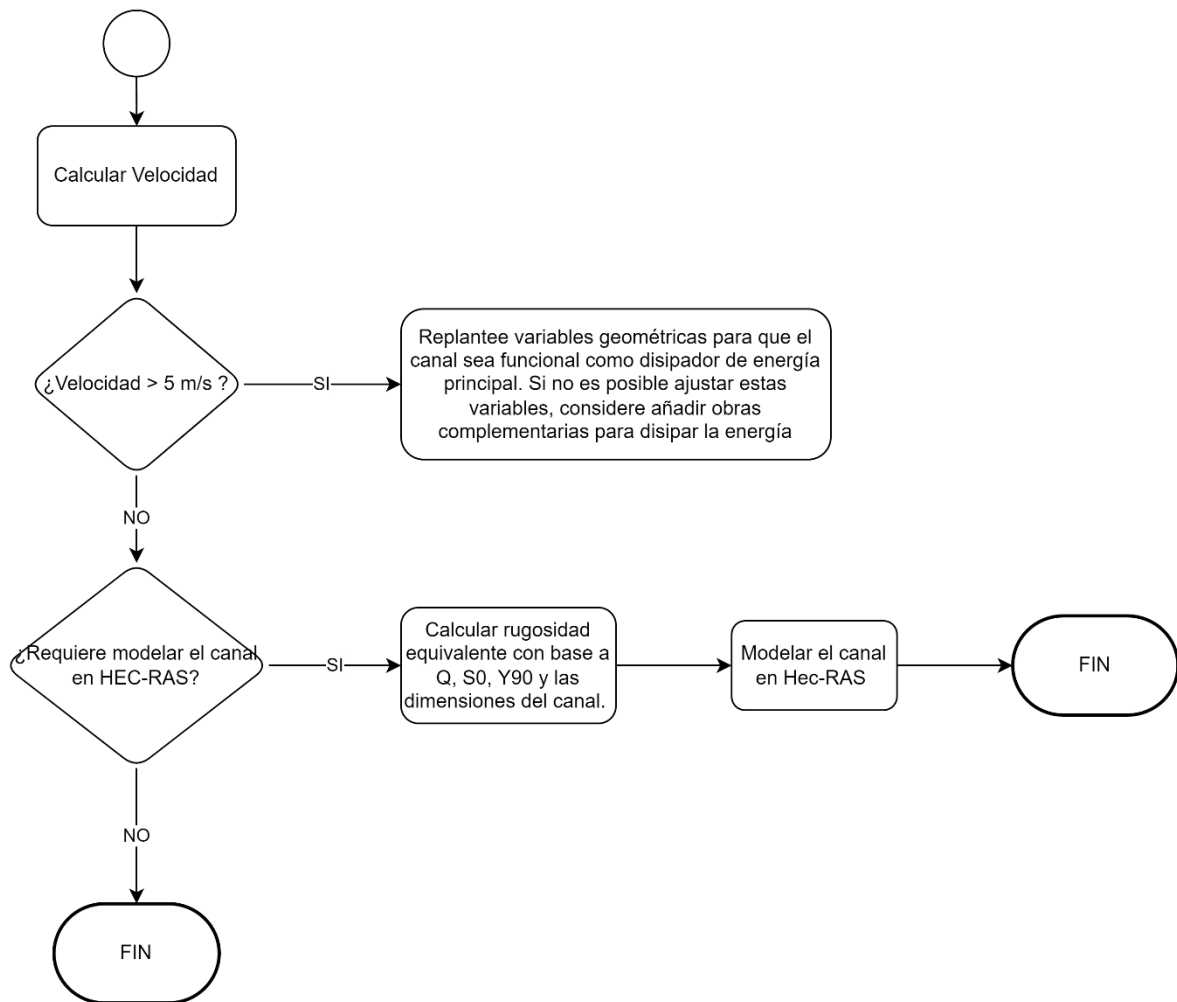


Figura 4

Diseño metodológico para el cálculo de canales escalonados (disipadores de energía). Parte III



3.4. Metodología unificada

La siguiente metodología para el diseño de canales escalonados es con relación principalmente a flujos cuyas características hidráulicas los clasifican como flujos supercríticos y se recomienda que se comporten como flujo rasante.

3.4.1. Recopilación de información básica citada en el numeral 3.2.

3.4.2. Delimitación del área de la cuenca dentro de la cual se ubique el proyecto o en su defecto delimitación del área a intervenir durante la ejecución del mismo.

3.4.3. Estimación de los caudales de crecientes a diferentes periodos de retorno, a partir del estudio hidrológico. Generalmente en drenajes en obras de infraestructura, el diseño de obras hidráulicas está asociado a la creciente de 100 años, no obstante, dependiendo de los requerimientos del cliente y de la normatividad o especificaciones del proyecto puede hacerse para un periodo de retorno determinado a partir de los más comunes (2.33, 5, 10, 25, 50, y 100 años).

3.4.4. Obtener el perfil longitudinal del terreno y posteriormente realizar el trazado en planta del eje del canal determinando cota superior e inferior; a partir de este eje, obtener el perfil longitudinal del canal.

3.4.5. Asumir el ancho (b) del canal y la altura o contrahuella (h) del escalón con criterios económicos e hidráulicos (la determinación correcta del ancho del canal es de suma importancia puesto que influye en variables como lámina de agua (y), materiales de construcción, espacio disponible, velocidad media del flujo y régimen de flujo). Adicionalmente por recomendación de Llano (2003), se debe garantizar que la altura de escalón seleccionada genere un régimen de flujo rasante al interior del canal; esto también se logra cumpliendo la siguiente recomendación:

$$y_c/h < 0.4 \text{ y } y_c/h > 1.1$$

3.4.6. Obtener la pendiente del canal (o de cada tramo del mismo si su trayectoria en el terreno presenta variaciones en la pendiente longitudinal) trazando una línea

recta de manera que se asemeje lo mejor posible al terreno para evitar al máximo grandes volúmenes de cortes y llenos.

Cuando existan cambios de pendiente se adecúa el escalonado de tal manera que se genere una aproximación a una curva vertical, con el fin de que el flujo se desarrolle regularmente y no se desprenda del canal ni se generen presiones e impactos que puedan ocasionar con el tiempo deterioro en el canal.

3.4.7. Calcular la huella del escalón (l):

$$l = \frac{S_0}{h} \text{ (Ecuación 2)}$$

3.4.8. Con el valor anterior calcular las siguientes expresiones:

$$h/l \text{ (Ecuación 3)}$$

$$y_c: \text{profundidad crítica (Ecuación 4)}$$

$$y_c/h \text{ (Ecuación 5)}$$

3.4.9. Por medio de las siguientes expresiones, establecer los rangos posibles dentro de los cuales podrá comportarse el flujo al interior del canal y cómo se va a clasificar:

$$y_c/h = 11.01(h/l)^2 - 4.398(h/l) + 1.249 \text{ (Ecuación 6: Límite superior Flujo Saltante)}$$

$$y_c/h = 17.476(h/l)^2 - 7.247(h/l) + 1.846 \text{ (Ecuación 7: Límite inferior Flujo Rasante)}$$

$$y_c/h = 0.0916(h/l)^{-1.276} \text{ (Ecuación 8: Límite superior resalto hidráulico totalmente desarrollado)}$$

- Si $y_c/h < y_c/h \text{ Lim sup R.H}$ → Resalto hdco totalmente desarrollado
- Si $y_c/h < y_c/h \text{ Lim sup F.Saltante}$ → Flujo saltante dentro del canal
- Si $y_c/h < y_c/h \text{ Lim sup F.Rasante}$ → Flujo en transición dentro del canal

- Si $y_c/h > y_c/h \text{ Lim sup } F$. Rasante \rightarrow Flujo rasante dentro del canal

Esto va a permitir definir las variables involucradas de tal manera que el flujo asociado a la creciente de diseño se comporte como un flujo rasante, este flujo se presenta generalmente cuando las pendientes del canal son altas y el agua pasa “rozando” el borde o arista de cada escalón; debajo de dichos escalones se forma un vórtice de recirculación de aire que mantiene el esfuerzo cortante y logra una mejor disipación de la energía del flujo.

3.4.10. Calcular C_e , d , Y_{90} y H_{muros} usando las siguientes ecuaciones:

$$C_e = 0.9 \text{sen}(\arctan(h/l)) \text{ (Ecuación 9)}$$

$$d = h * 0.24 * ((Q/B)/(gh^3 \text{sen}(\tan^{-1}(h/l))^{0.5})^{0.65}) \text{ (Ecuación 10)}$$

$$y_{90} = d/1 - C_e \text{ (Ecuación 11)}$$

$$H_{\text{muros}} = 1.45y_{90}^4 \text{ (Ecuación 12)}$$

3.4.11. Calcular la velocidad del flujo:

$$V = (Q/b)/y_{90} \text{ (Ecuación 13)}$$

- Si $V > 5\text{m/s}$ \therefore replantee variables geométricas como ancho, altura de muros y pendiente de ser posible, para que el canal sea funcional como disipador de energía principal. Si no pueden realizarse ajustes a estas variables, considere la posibilidad de añadir obras adicionales en el descarga del canal como complemento a la disipación de energía para evitar socavación. Cuando la descarga se realiza a un cauce natural no son convenientes velocidades muy altas porque se puede generar socavación.⁵

⁴ Este valor es el recomendado en la tesis de Llano (2003), sin embargo, se da libertad al diseñador de elegir un borde libre tomando en cuenta las particularidades de cada proyecto, por ejemplo: si se trata de un flujo de escorrentía o por el contrario de un flujo constante en el tiempo, entre otros. Al mismo tiempo se considera que la metodología planteada está orientada a flujos supercríticos con salpicaduras por lo que debe garantizarse holgura en el borde libre. La empresa Hidrycas optó por tener alturas de muros mayores de 2 veces el y_{90} .

⁵ La empresa Hidrycas adopta un criterio para la consideración de velocidades altas de hasta 6m/s, sin embargo, para el presente informe se opta por un valor más conservador.

- Si $V < 5m/s$ ∴ verifique la descarga del canal:

Si se requiere realizar una modelación del canal diseñado ya sea para evaluar las condiciones con y sin proyecto cuando la descarga se realiza a una corriente natural o, para evaluar sus beneficios cuando interactúa con otras obras hidráulicas entre otros, es necesario calcular una rugosidad (n) equivalente con base en el caudal de diseño, las dimensiones del canal y la pendiente, utilizando la Ecuación 1, de tal forma que el pseudo-fondo del canal pase por las aristas de los escalones como si estos no existieran.⁶

3.4.12. Una vez finalizado el diseño del canal, puede apoyarse visualmente mediante la elaboración de una gráfica donde se muestre la clasificación del flujo para cada periodo de retorno utilizando las ecuaciones del numeral **3.4.9**. Un ejemplo de esta se presenta en los anexos.

⁶ Aunque la disipación de energía no depende de la calidad del material en que se construye el canal, es claro que debe ser un material que sea resistente al desgaste y a la erosión.

4. Resultados

En las Tabla 1 y Tabla 2 se plantea el caso de un canal con el mismo ancho y caudal de diseño y con una variación en la pendiente, para el caso 1 se tiene una pendiente del 100% y para el caso 2 del 50%. Cuando se comparan los resultados de ambos casos es posible observar que aquel con mayor pendiente presenta mayor eficiencia al momento de disipar la energía, esto se observa en la reducción de la velocidad media del flujo y en el coeficiente de rugosidad equivalente.

Adicionalmente se presenta un caso extra en el cual se tiene un canal con un ancho menor al presentado en los dos casos anteriores, con las mismas condiciones en cuanto a variación de pendiente y caudal (Ver Tabla 3 y Tabla 4). En este caso es posible observar no solo la eficiencia energética cuando se tiene mayor pendiente como ya se mencionó, sino también la influencia del ancho del canal en el incremento de la velocidad media del flujo y por ende en la disipación de la energía (para este caso donde hay una reducción del ancho hidráulico del canal). Por otra parte, se observa el efecto directo que tiene la variación del ancho en el régimen de flujo generado al interior del canal, puesto que está relacionado directamente con la profundidad crítica y_c del flujo, la cual junto con la altura de escalón son determinantes a la hora de establecer los límites entre un régimen y otro.

En este caso se observa que para los casos 1 y 2 se tenía un régimen de flujo en transición para los periodos de retorno de 2.33 y 5 años y que cuando se disminuyó el ancho del canal, el flujo paso a un régimen de flujo rasante. Es importante aclarar que no se está contradiciendo lo que se ha dicho a lo largo del informe en cuanto a que se recomienda que el diseño del canal escalonado siempre se ubique dentro del régimen de flujo rasante, puesto que Llano (2003) en sus tesis indica que el flujo puede estar en estado de transición siempre y cuando no se trate del caudal de diseño.

La aplicación presentada para el cálculo de canales escalonados es una aplicación dinámica y amigable con el usuario que permite que este evalúe diferentes posibilidades y con criterios económicos, hidráulicos y de disponibilidad del espacio, decida cuales variables y parámetros del diseño se ajustan mejor a sus necesidades.

Tabla 1*Resultados cálculos canal escalonado. Pendiente del 100%, ancho de 2m*

Tr	Altura escalón (h)	Huella escalón (l)	Ancho del canal	h/l	Caudal	Yc	Yc/h	Régimen de Flujo	Ce	d	Y ₉₀	H muro	v
años	m	m	m		m ³ /s	m			m		m	m	m
2.33	0.50	0.50	2.00	1.00	1.097	0.31	0.63	Flujo en Transición	0.64	0.085	0.234	0.339	2.344
5	0.50	0.50	2.00	1.00	1.597	0.40	0.80	Flujo en Transición	0.64	0.109	0.299	0.433	2.674
10	0.50	0.50	2.00	1.00	2.039	0.47	0.95	Flujo Rasante	0.64	0.127	0.350	0.508	2.912
25	0.50	0.50	2.00	1.00	2.779	0.58	1.16	Flujo Rasante	0.64	0.156	0.428	0.621	3.246
50	0.50	0.50	2.00	1.00	3.401	0.67	1.33	Flujo Rasante	0.64	0.177	0.488	0.708	3.483
100	0.50	0.50	2.00	1.00	4.082	0.75	1.50	Flujo Rasante	0.64	0.200	0.550	0.797	3.713

Condición de operación	n	b	z	y	B	A	P	Rh	Ancho superficial	S ₀	V	Q	Nro. De Froude
		m	m	m	m	m ²	m	m	m		m/s	m ³ /s	
25	0.138	2.00	0.00	0.43	2.00	0.86	2.86	0.30	2.00	1.00	3.25	2.779	1.58
100	0.135	2.00	0.00	0.55	2.00	1.10	3.10	0.35	2.00	1.00	3.71	4.082	1.60

Tabla 2*Resultados cálculos canal escalonado. Pendiente del 50%, ancho de 2m*

Tr	Altura escalón (h)	Huella escalón (l)	Ancho del canal	h/l	Caudal	Yc	Yc/h	Régimen de Flujo	Ce	d	Y ₉₀	H muro	v
años	m	m	m		m ³ /s	m			m		m	m	m
2.33	0.40	0.80	2.00	0.50	1.097	0.31	0.78	Flujo en Transición	0.40	0.098	0.164	0.238	3.338
5	0.40	0.80	2.00	0.50	1.597	0.40	1.01	Flujo en Transición	0.40	0.125	0.210	0.304	3.807
10	0.40	0.80	2.00	0.50	2.039	0.47	1.18	Flujo Rasante	0.40	0.147	0.246	0.356	4.147
25	0.40	0.80	2.00	0.50	2.779	0.58	1.45	Flujo Rasante	0.40	0.180	0.301	0.436	4.621
50	0.40	0.80	2.00	0.50	3.401	0.67	1.66	Flujo Rasante	0.40	0.205	0.343	0.497	4.960
100	0.40	0.80	2.00	0.50	4.082	0.75	1.88	Flujo Rasante	0.40	0.231	0.386	0.560	5.288

Condición de operación	n	b	z	y	B	A	P	Rh	Ancho superficial	S ₀	V	Q	Nro. De Froude
		m	m	m	m	m ²	m	m	m		m/s	m ³ /s	
25	0.058	2.00	0.00	0.30	2.00	0.60	2.60	0.23	2.00	0.50	4.62	2.779	2.69
100	0.057	2.00	0.00	0.39	2.00	0.77	2.77	0.28	2.00	0.50	5.29	4.082	2.72

Tabla 3*Resultados cálculos canal escalonado. Pendiente del 100%, ancho de 1m*

Tr	Altura escalón (h)	Huella escalón (l)	Ancho del canal	h/l	Caudal	Yc	Yc/h	Régimen de Flujo	Ce	d	Y ₉₀	H muro	v
años	m	m	m		m ³ /s	m			m		m	m	m
2.33	0.50	0.50	1.00	1.00	1.097	0.50	0.99	Flujo Rasante	0.64	0.133	0.367	0.532	2.988
5	0.50	0.50	1.00	1.00	1.597	0.64	1.28	Flujo Rasante	0.64	0.170	0.469	0.679	3.408
10	0.50	0.50	1.00	1.00	2.039	0.75	1.50	Flujo Rasante	0.64	0.200	0.549	0.796	3.712
25	0.50	0.50	1.00	1.00	2.779	0.92	1.85	Flujo Rasante	0.64	0.244	0.672	0.974	4.137
50	0.50	0.50	1.00	1.00	3.401	1.06	2.11	Flujo Rasante	0.64	0.279	0.766	1.111	4.440
100	0.50	0.50	1.00	1.00	4.082	1.19	2.39	Flujo Rasante	0.64	0.314	0.863	1.251	4.733

Condición de operación	n	b	z	y	B	A	P	Rh	Ancho superficial	S ₀	V	Q	Nro. De Froude
		m	m	m	m	m ²	m	m	m		m/s	m ³ /s	
25	0.105	1.00	0.00	0.67	1.00	0.67	2.34	0.29	1.00	1.00	4.14	2.779	1.61
100	0.098	1.00	0.00	0.86	1.00	0.86	2.73	0.32	1.00	1.00	4.73	4.082	1.63

Tabla 4*Resultados cálculos canal escalonado. Pendiente del 100%, ancho de 1m*

Tr	Altura escalón (h)	Huella escalón (l)	Ancho del canal	h/l	Caudal	Yc	Yc/h	Régimen de Flujo	Ce	d	Y ₉₀	H muro	v
años	m	m	m		m ³ /s	m			m		m	m	m
2.33	0.40	0.80	1.00	0.50	1.097	0.50	1.24	Flujo Rasante	0.40	0.154	0.258	0.374	4.255
5	0.40	0.80	1.00	0.50	1.597	0.64	1.60	Flujo Rasante	0.40	0.197	0.329	0.477	4.852
10	0.40	0.80	1.00	0.50	2.039	0.75	1.88	Flujo Rasante	0.40	0.230	0.386	0.559	5.285
25	0.40	0.80	1.00	0.50	2.779	0.92	2.31	Flujo Rasante	0.40	0.282	0.472	0.684	5.890
50	0.40	0.80	1.00	0.50	3.401	1.06	2.64	Flujo Rasante	0.40	0.321	0.538	0.780	6.322
100	0.40	0.80	1.00	0.50	4.082	1.19	2.98	Flujo Rasante	0.40	0.362	0.606	0.878	6.739

Condición de operación	n	b	z	y	B	A	P	Rh	Ancho superficial	S ₀	V	Q	Nro. De Froude
		m	m	m	m	m ²	m	m	m		m/s	m ³ /s	
25	0.047	1.00	0.00	0.47	1.00	0.47	1.94	0.24	1.00	0.50	5.89	2.779	2.74
100	0.044	1.00	0.00	0.61	1.00	0.61	2.21	0.27	1.00	0.50	6.74	4.082	2.76

5. Conclusiones

- Las mayores tasas de disipación de energía se observan en los flujos saltantes y las más bajas en los flujos rasantes; sin embargo, el flujo saltante no siempre es accesible a efectos prácticos debido a la necesidad de grandes alturas de escalones y pendientes planas, especialmente si incluye un salto hidráulico completamente desarrollado. Los flujos rasantes son más adecuados para estructuras con pendientes pronunciadas como los esperados en regiones montañosas con limitaciones topográficas.
- La concentración media de aire en los flujos rasantes genera una disminución en la fricción del canal conforme aumenta dicha concentración, esta tendencia es extremadamente cercana a la estimación de reducción de fricción en canales lisos, aunque el mecanismo es completamente diferente ya que para este último la resistencia al flujo se debe principalmente a la fricción con el material del canal, mientras que para los canales escalonados con flujo rasante está dominada por el proceso de recirculación ya mencionado y por los intercambios de momento inestables entre la corriente principal y los flujos de cavidad. Esta conclusión valida el cálculo del coeficiente de rugosidad de Manning equivalente utilizado para la modelación del canal en el software HEC-RAS; con estas rugosidades se hace la modelación hidráulica del canal como si no existieran los escalones sino una plantilla teórica o pseudo-fondo que pasa por todas las aristas de éstos. Es posible comprobar que al aplicar la rugosidad equivalente el efecto y el régimen de flujo es el mismo obtenido en la evaluación del escalonado.
- Las consecuencias positivas del aire dentro del flujo son la reducción del riesgo de cavitación y la posibilidad de re-oxigenación del agua como en las plantas de tratamiento de agua. Por otra parte, los efectos negativos son el incremento en el volumen del flujo y una mayor profundidad del flujo de aire-agua (y_{90}), que es un parámetro que determina la altura final de las paredes laterales del canal. Además, la aireación del flujo reduce la resistencia del mismo y, por lo tanto, la tasa de disipación de energía.

- La pérdida de energía para el flujo rasante solo se puede calcular teóricamente en los casos en que se alcanza un flujo uniforme a lo largo del canal. La longitud del canal y la descarga o caudal son factores que influyen en el desarrollo del flujo uniforme. Estudios realizados por Llano (2003) han demostrado que no se requiere que el canal tenga una longitud o una descarga muy grandes para que se desarrolle este tipo de flujo.
- De la Ecuación 11 se puede observar que la profundidad uniforme del agua (d) varía casi exclusivamente con la pendiente y el caudal, independientemente de la altura del escalón.
- Dado que parece que no se logra un acuerdo general para la altura óptima del escalón y por ende para la cantidad de los mismos, puesto que algunos autores afirman que el número de escalones aumenta fuertemente la disipación de la energía y otros autores todo lo contrario, y, aún persisten las discrepancias, una recomendación válida ha planteado que la altura del escalón debe seleccionarse de modo que el régimen de flujo en el canal esté distintivamente en el flujo saltante o en el régimen de flujo rasante, de lo contrario siempre habrá el riesgo de que se produzcan cargas hidráulicas máximas en el régimen de transición con posibles inestabilidades hidrodinámicas. No obstante, la empresa adopta y recomienda que siempre se diseñe bajo condiciones de flujo rasante por razones ya mencionadas.

En términos generales, la altura de los escalones no afecta considerablemente a la tasa de disipación de energía por lo que la recomendación mencionada anteriormente tiene que ser considerada importante para el diseño de los canales escalonados propuestos.

- El ancho permite controlar la velocidad del flujo, de esta manera, a mayor ancho menor velocidad media dentro del canal, sin embargo, es necesario considerar temas económicos y disponibilidad de espacio al momento de decidir sobre este parámetro.
- Cuando el flujo no es rasante no se desarrolla la condición de equilibrio uniforme (y_{90}) y por lo tanto no aplica un estimativo de rugosidad equivalente.

Referencias bibliográficas

Amador, A. (2005). Comportamiento hidráulico de los aliviaderos escalonados en presas de Hormigón compactado. UPC BarcelonaTech.

Chow, Ven Te. (1994). Hidráulica de Canales Abiertos. Edit. McGraw Hill, Santafé de Bogotá

Duarte, C. A. (2009). Introducción a la Hidráulica de Canales.

Fernández, F. M. (2010). Estructuras de vertimiento de aguas en laderas de media a fuerte pendiente. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Arquitectura.

Fernández, F. M. (1998). Hidrología e hidráulica. CORPOCALDAS e INVIAS. Manual para el control de la erosión. Manizales – Colombia: EDITAR S.A.

French, R. H., & Friedman, A. (1985). Hidráulica de canales abiertos. McGraw-Hill Education.

Llano, S. (2003). Hydraulics of Stepped Structures- Importance of Flow Regimes on Stepped Chutes and Practical Application in Developing Countries. UNESCO- IHE Institute for Water Education.

Pardo R. & Alegret E. (2012). Diseño hidráulico de aliviaderos y obras de toma para presas. Editorial Félix Varela, ISBN 978-959-07-1692-8, La Habana, Cuba.

Pardo R. (2017). Monografía sobre disipadores de energía. ISBN: 978-959-261-565-6. Departamento de Ediciones CUJAE, La Habana, Cuba.

Peterka A. J. (1984). Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. Engineering monograph No. 25. United States Bureau of Reclamation (USBR). Denver, Colorado, USA.

Ramírez, J. (s.f.) Canal con pantallas deflectoras: Estudio con modelos hidráulicos. BOLETÍN DE VÍAS. Vol. 6, N° 37. Enero/Marzo, 1978. p. 1

Rosado, G. (2017). Metodología para el diseño de canales escalonados, disipadores de energía, empleados en drenaje urbano, basada en modelación física. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente

Anexos

Anexo 1. Aplicación para el cálculo de canales escalonados

Figura 5

Guía aplicación para el cálculo de canales escalonados (disipadores de energía). Parte I

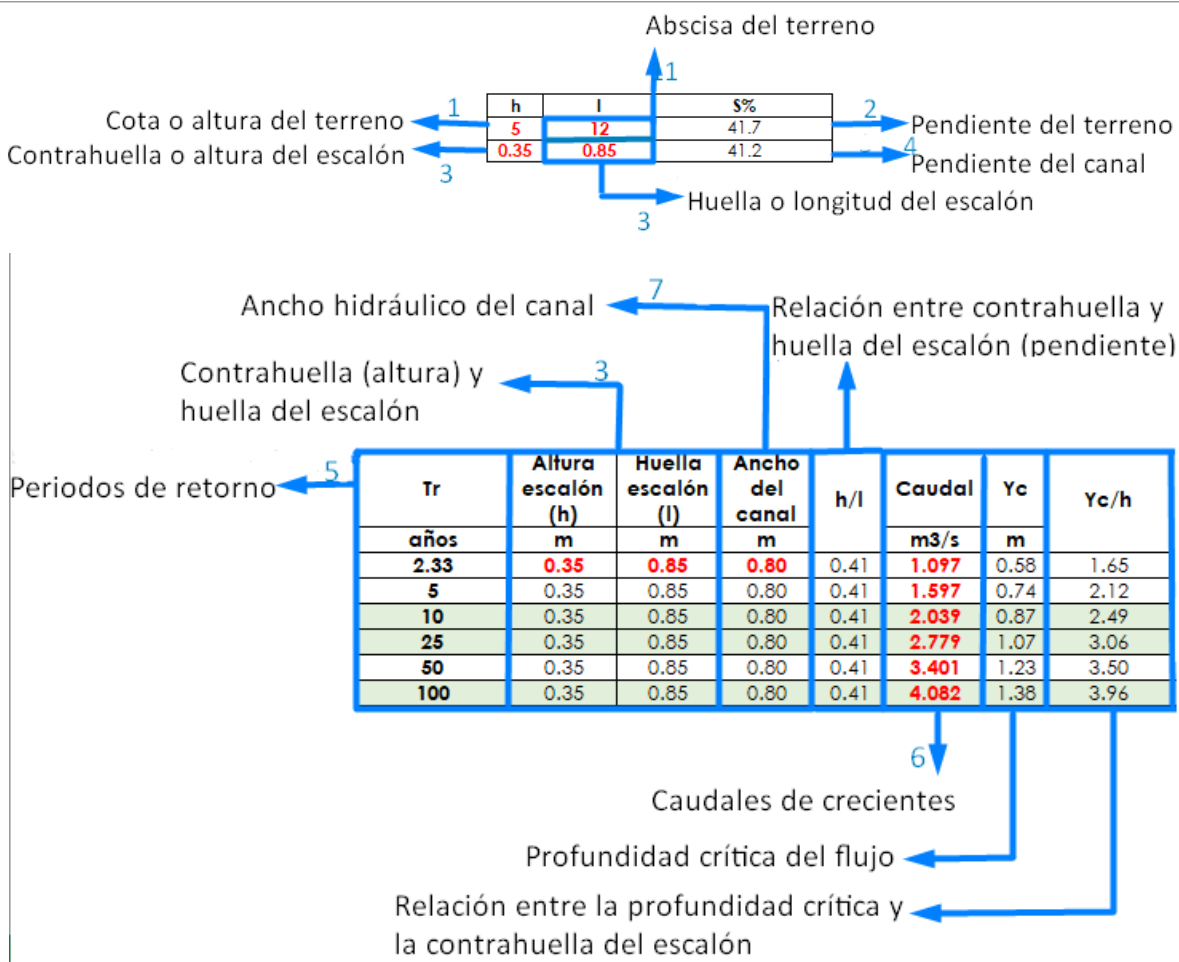


Figura 6

Guía aplicación para el cálculo de canales escalonados (disipadores de energía). Parte II

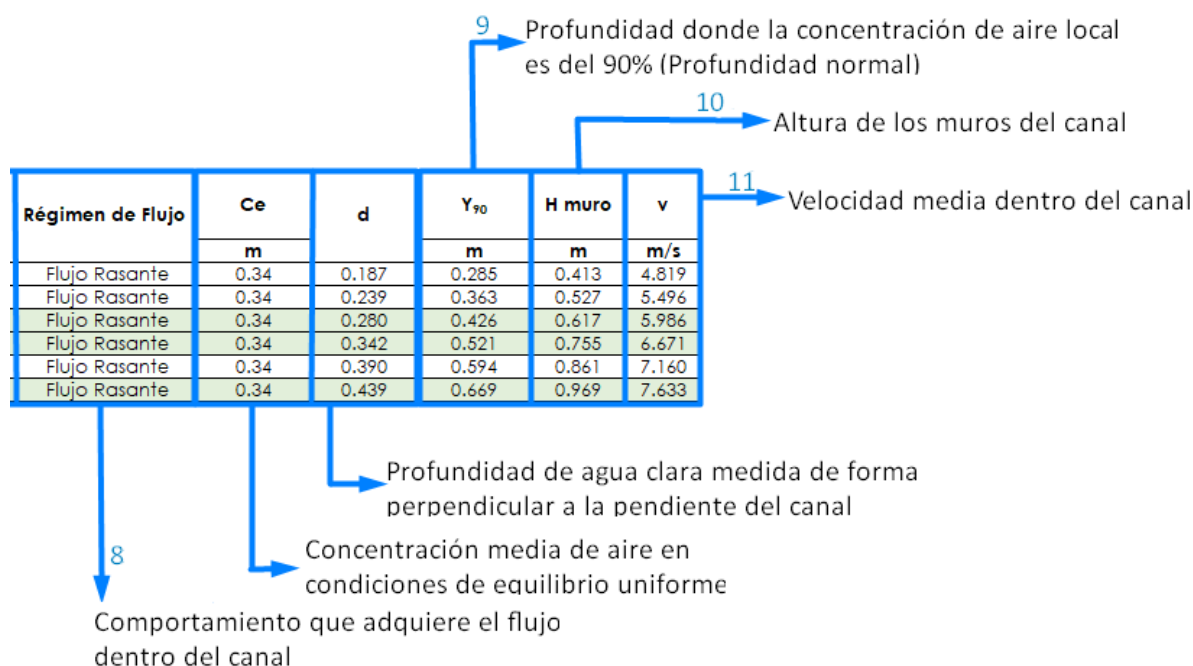
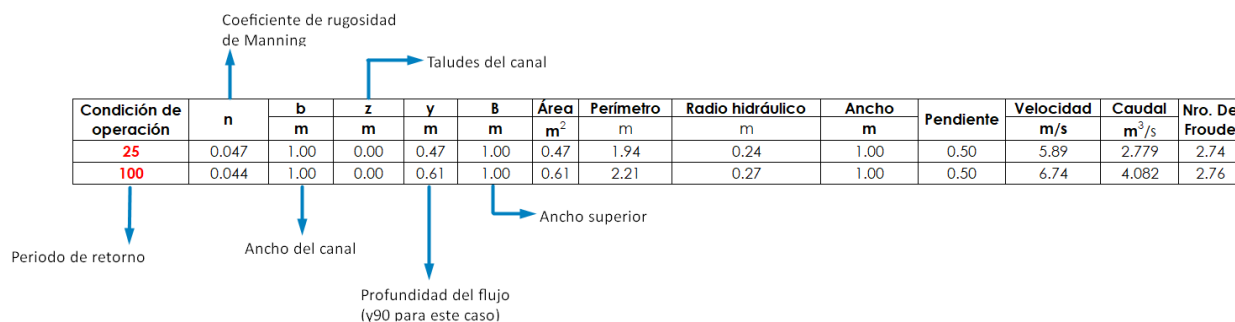


Figura 7

Guía aplicación para el cálculo de canales escalonados (disipadores de energía). Parte III: Cálculo de la rugosidad equivalente



Observaciones:

- Los valores señalados en color rojo es la información que el usuario debe ingresar a la aplicación; los demás valores se calculan automáticamente con las fórmulas presentadas en el numeral 3.4
- Se numeran aquellos pasos en los cuales el diseñador debe presentar especial atención para el adecuado diseño del canal, esto no implica que los demás pasos sean menos importantes.

- Se señalan con verde las filas correspondientes a los periodos de retorno comúnmente usados para el diseño de obras hidráulicas. Depende de la importancia de la obra y el criterio según la norma usada.

Figura 8

Gráfica clasificación de las condiciones de flujo - Caso 4.

