



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS CFD DEL PORCENTAJE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN RÁPIDAS
ESCALONADAS CON FLUJO RASANTE PARA CAUDALES PLUVIALES DE LAS
ZONAS NORTE, CENTRO Y SUR DE LA CIUDAD DE QUITO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingenieros Civiles

AUTORES: Carlos David Castrillón Rosero
Wilson Andrés Tipán Tipán
TUTOR: Byron Andrés Heredia Hidalgo

Quito - Ecuador
2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Carlos David Castrillón Rosero con documento de identificación N° 1723049191 y Wilson Andrés Tipán Tipán con documento de identificación N° 1726095399; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 17 de febrero del 2023

Atentamente,



Carlos David Castrillón Rosero
1723049191



Wilson Andrés Tipán Tipán
1726095399

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Carlos David Castrillón Rosero con documento de identificación N° 1723049191 y Wilson Andrés Tipán Tipán con documento de identificación N° 1726095399; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Análisis CFD del Porcentaje de disipación de Energía en Rápidas Escalonadas con Flujo Rasante para Caudales Pluviales de las Zonas norte, centro y sur de la Ciudad de Quito”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Civiles, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 17 de febrero del 2023

Atentamente,



Carlos David Castrillón Rosero

1723049191



Wilson Andrés Tipán Tipán

1726095399

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Byron Andrés Heredia Hidalgo con documento de identificación N° 1719147066, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS CFD DEL PORCENTAJE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN RÁPIDAS ESCALONADAS CON FLUJO RASANTE PARA CAUDALES PLUVIALES DE LAS ZONAS NORTE, CENTRO Y SUR DE LA CUIDAD DE QUITO, realizado por Carlos David Castrillón Rosero con documento de identificación N° 1723049191 y por Wilson Andrés Tipán Tipán con documento de identificación N° 1726095399, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 17 de febrero del 2023

Atentamente,



Ing. Byron Andrés Heredia Hidalgo, MSc.

1719147066

ANÁLISIS CFD DEL PORCENTAJE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN RÁPIDAS ESCALONADAS CON FLUJO RASANTE PARA CAUDALES PLUVIALES DE LAS ZONAS NORTE, CENTRO Y SUR DE LA CIUDAD DE QUITO

CFD ANALYSIS OF THE PERCENTAGE OF ENERGY DISSIPATION IN STEPPED RAPIDS WITH SKIMMING FLOW FOR RAINFALL FLOWS IN THE NORTH, CENTER AND SOUTH ZONES OF THE QUITO CITY

Carlos Castrillón¹-Rosero¹, Wilson Tipán-Tipán², Andres Heredia-Hidalgo³

Resumen

El estudio evalúa semiempíricamente y numéricamente el comportamiento del flujo rasante y disipación de energía de tres propuestas de rápidas escalonadas para caudales pluviales pico en zonas sur, centro y norte de Quito. Se desarrolló un algoritmo para prediseñar las estructuras propuestas mediante expresiones semiempíricas, evaluando el porcentaje de disipación de energía y corroborar la coherencia de resultados con los obtenidos mediante un análisis numérico CFD.

Los resultados obtenidos evidencian una similitud entre el porcentaje de disipación de energía obtenido en la simulación numérica y la calculada de manera teórica/semiempírica para los caudales propuestos ($Q_1 = 12.35 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_2 = 11.71 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_3 = 6.83 \text{ m}^3/\text{s}$). Se verificó un correcto desarrollo de flujo rasante, aireación en el flujo, punto de inyección y energía remanente teórico-numérico similares. Se observaron limitaciones en el algoritmo semiempírico para caudales pequeños que provocan un desarrollo deficiente del flujo aireado. No obstante, este estudio representa un aporte para el prediseño de estructuras escalonadas con flujo rasante para diversos caudales y condiciones de terreno.

Palabras Clave: Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), Disipación de Energía, Rápidas Escalonadas.

Abstract

The study evaluates semi-empirically and numerically the skimming flow behaviour and energy dissipation of three proposed stepped chutes for peak storm flows in southern, central and northern areas of Quito. An algorithm was developed to technically design the proposed structures by semi-empirical expressions, evaluating the percentage of energy dissipation and corroborating the consistency of these results with those obtained from a CFD numerical analysis.

The results obtained show a similarity between the percentage of energy dissipation obtained in the numerical simulation and that calculated theoretically/semiempirically for the proposed flow rates ($Q_1 = 12.35 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_2 = 11.71 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_3 = 6.83 \text{ m}^3/\text{s}$). A correct development of the skimming flow, aeration phenomenon, location of the inception point and similar theoretical-numerical remaining energy was verified. Some limitations were observed in the semi-empirical algorithm for small flow rates that lead to poor aerated flow development. Nevertheless, this study represents a contribution to the pre-design of stepped structures with skimming flow for various flow rates and terrain conditions.

Keywords: Computational Fluid Dynamics (CFD), Energy Dissipation, Swimming Flow, Stepped Rapids.

¹ Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana Quito – Ecuador

² Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana Quito – Ecuador

³ Docente de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana Quito – Ecuador

Autor para correspondencia: ccastrillon@est.ups.edu.ec, wtipant@est.ups.edu.ec, bheredia@ups.edu.ec

1. Introducción

El crecimiento poblacional en la ciudad de Quito y el cambio climático, producido por distintos factores ambientales, han causado que en los últimos años se evidencien registros de caudales de descarga considerables, los mismos que, sumados a los relieves irregulares de laderas presentes en la ciudad, pueden causar desastres como inundaciones, erosión fluvial en quebradas y desestabilización de taludes por una deficiencia en el diseño de estructuras de disipación de energía hidráulica. Además, el poco mantenimiento de las obras hidráulicas existentes y la escasa innovación tecnológica para aplicar los respectivos análisis computacionales que evalúen el rendimiento y condición actual de las estructuras diseñadas previamente, evidencian la necesidad de mejorar considerablemente el control de los caudales de descarga desarrollados en los sectores de mayor riesgo hidráulico.

Una condición presente en la ciudad de Quito son las zonas de alto relieve y caudales de descarga de gran magnitud. Por lo tanto, conocidas las zonas de interés y los datos más importantes para el diseño, tales como pendiente promedio del terreno (entre 20° a 24°) y caudales pluviales pico con periodos de retorno de 20 años, se ha propuesto el prediseño de tres rápidas escalonadas, cuya disposición aventaja a canales de recolección y conducción similares, debido a que éstas desarrollan un flujo rasante (skimming flow) con una considerable disipación de energía hidráulica, gracias a los vórtices y procesos de aireación típico del flujo que se provocan en sus escalones. [1]

Por otro lado, la disposición de estas estructuras dificulta la evaluación de los diferentes fenómenos que se desarrollan en dicho flujo de manera teórica (punto de inyección, velocidades de flujo rasante, velocidades de recirculación en escalones, tirante aireado a C90, energía remanente), así como los diferentes regímenes de flujo que se desarrollan en toda la estructura, por ende, es importante evaluarlos mediante una herramienta complementaria, en este caso la modelación numérica CFD, y así, disminuir la incertidumbre ocasionada por un análisis semiempírico.

Por lo descrito anteriormente, esta investigación se enfoca en el estudio teórico y computacional de tres propuestas de canales de restitución escalonado (Rápidas escalonadas), para zonas estratégicas del sur, centro y norte de la ciudad capital, desarrolladas para pendientes promedio (entre 20° a 24°) y caudales pluviales pico con tiempos de retorno de 20 años, determinados mediante el método racional, en función de datos de precipitaciones horarias pico otorgadas por la entidad competente.

Además, mediante el diseño de las estructuras escalonadas se garantiza un flujo rasante en los terrenos irregulares de interés que presenten una condición de alto riesgo en la ciudad de Quito, por lo tanto, se busca determinar la factibilidad de aplicar los modelos propuestos en campo, lo que permitirá una correcta conducción del flujo y una disipación de energía controlada y efectiva al pie de la estructura, y así presentar una solución a la problemática expuesta previamente.

Este estudio realizará una comparativa entre el modelamiento teórico y la simulación numérica CFD de las rápidas escalonadas de interés, de tal forma que se puedan contrastar los resultados de disipación de energía y condiciones de flujo determinados en hojas de cálculo, elaboradas en un algoritmo Mathcad, en base a estudios experimentales de rápidas escalonadas desarrollados según Chanson [2], Kathsuria [3] y los derivados mediante la modelación numérica en el paquete comercial de análisis de fluidos computacional FLOW 3D. [4] [5]

El estudio busca confirmar una congruencia de resultados teórico-numérico que garanticen un correcto prediseño de cada modelo de rápida escalonada propuesta y, por otro lado, evidenciar las limitaciones del algoritmo teórico desarrollado, en la determinación de una serie de fenómenos de flujo presentes en la estructura de interés que demuestren la importancia de evaluar numéricamente el comportamiento y funcionamiento de las obras hidráulicas propuestas y presentes en el territorio.

2. Materiales y Métodos

2.1. Recolección de datos

2.1.1. Determinación de Caudales Pluviales Pico por el Método Racional

El método racional presenta un procedimiento estimativo para el cálculo de caudales máximos o también llamados caudales pico, los cuales se usan principalmente para diseñar estructuras hidráulicas en específico o sistemas de drenaje pluvial. Este método es ideal para estudios preliminares, en sectores de los cuales se dispone parcialmente de los datos reales de precipitaciones máximas horarias en un área de estudio establecida.

Según Briere [6] “El método racional se utiliza para calcular rápidamente el caudal máximo de escurrimiento originado por una lluvia uniforme de intensidad constante en pequeñas cuencas; por lo tanto, es el método perfecto para las pequeñas cuencas urbanas”.

A su vez, según Mediero [7] “el método racional se define como la fórmula empírica desarrollada más difundida en el mundo de la ingeniería, debido a su simplicidad y la relativa precisión de sus resultados”.

2.1.2. Caudal Pluvial Pico

Se refiere al volumen de aguas lluvia, dado por la precipitación, que llega a la superficie en un determinado tiempo. Su valor está ligado a la intensidad de las lluvias, al área de la cuenca de aportación y al coeficiente de escorrentía medio desarrollado en la superficie de interés. [7] Se define así, como el valor más importante para el diseño de una estructura de carácter hidráulico, ya que de éste dependerá la capacidad y la disposición de la estructura.

Por lo tanto, Mediero [7] propone la siguiente ecuación para calcular el caudal punta de avenida o también llamado caudal pluvial pico:

$$Q = \frac{C * I * A}{3,6} \quad (1)$$

Donde:

Q = Caudal pluvial máximo - Caudal de diseño (m^3/s)

C = Coeficiente de Escorrentía

I = Intensidad media de lluvia para una tormenta con una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca (mm/h)

A = Área de drenaje de la cuenca (km^2)

El coeficiente divisor de valor 3,6 permite obtener el caudal en m^3/s a partir de la intensidad en mm/h y el área de drenaje en km^2 .

2.1.3. Intensidad

Se determina mediante la relación entre la precipitación medida y el tiempo de lluvia, su unidad de medida es el $mm/hora$. Para la presente investigación, es un dato otorgado mediante la entidad pertinente EPMAPS, la cual dispuso datos de precipitaciones máximas horarias para un periodo de retorno promedio de 20 años en las estaciones pluviométricas de interés (P20 Calderón, P56 Tanque Solanda, C18 Puengasí).

A su vez, es uno de los parámetros más importantes para encontrar el caudal pluvial pico, dato fundamental para el prediseño de rápida escalonada, y se define según la INAMHI como:

Cantidad de agua de lluvia que cae en un punto, por unidad de tiempo y es inversamente proporcional a la duración de la tormenta. La intensidad es tasa temporal de precipitación, es decir, la cantidad de agua que precipitó medida en la duración de la lluvia. [8]

Tabla 1. Precipitaciones máximas horarias otorgadas por la EPMAPS en las estaciones de interés con un periodo de retorno de 20 años.

Precipitaciones			
Estación	Nombre	Parroquia	Valor (mm/h)
C18	Puengasí	Itchimbia	34,2
P20	Calderón	Calderón	35
P56	Tanque Solanda	La Argelia	29,4

2.1.4. Coeficiente de Escorrentía

Es un factor que depende en su totalidad del tipo de superficie, o tipo de suelo in situ en la cuenca de estudio. Permite el cálculo de la intensidad de

escorrentía (producto de la Intensidad de Lluvia y el Coeficiente de Escorrentía), la cual tiene un valor menor o igual a la intensidad de lluvia para diferentes condiciones de permeabilidad.

Así lo menciona Mediero [7] “El coeficiente de escorrentía tiene en cuenta que no toda la precipitación se convierte en escorrentía, sino que existen pérdidas de precipitación en la cuenca, a causa de los procesos de interceptación, infiltración y evapotranspiración”.

2.1.5. Coeficiente de Escorrentía Ponderado

Al tomar en cuenta la gran variedad de suelos, de pendientes y superficies que se pueden encontrar en la cuenca hidrográfica definida, así como el considerable desarrollo urbano de las áreas de aportación de estudio, se recomienda dividir a la cuenca en zonas, y para cada una de las mismas asignar un coeficiente de escorrentía idóneo, para luego encontrar un coeficiente promedio ponderado.

Según Morasutti [9] “El procedimiento recomendado para seleccionar el coeficiente de escorrentía consiste en obtener un promedio ponderado después de haber dividido la cuenca en zonas homogéneas en cuanto al tipo de suelo, pendiente y cobertura vegetal”. De tal forma que, se calcula el coeficiente de escorrentía ponderado mediante la ecuación siguiente:

$$C_p = \frac{C_1 * A_1 + C_2 * A_2 + C_3 * A_3 + \dots + C_n * A_n}{A_T} \quad (2)$$

Donde:

C_p = Coeficiente de Escorrentía Ponderado

C_{1-n} = Coeficiente de Escorrentía de las n Áreas definidas

A_{1-n} = Magnitud de las n Áreas definidas (km²)

A_T = Magnitud del Área Total de la Cuenca (km²)

Los coeficientes de escorrentía considerados para el cálculo del coeficiente de escorrentía ponderado fueron los siguientes, en base a la bibliografía previamente mencionada:

TIPO DE AREA	VALOR DE "C"	
COMERCIAL		
• CENTRO DE LA CIUDAD	0,70	0,95
• ALREDEDORES	0,50	0,70
RESIDENCIAL		
• UNIFAMILIAR	0,30	0,50
• MULTIFAMILIAR SEPARADO	0,40	0,60
• MULTIFAMILIAR AGRUPADO	0,60	0,75
• SUB URBANA	0,25	0,40
INDUSTRIAL		
• LIVIANA	0,50	0,60
• PESADA	0,60	0,90
OTROS		
• PARQUES Y CEMENTERIOS	0,10	0,25
• PARQUES PARA JUEGOS	0,20	0,35
TIPO DE SUPERFICIE	VALOR DE "C"	
PAVIMENTOS		
• ASFALTO O CONCRETO	0,70	0,95
• LADRILLOS	0,70	0,85
TECHOS Y AZOTEAS	0,70	0,95
CAMINOS DE GRAVA	0,30	
AREAS DE SUELO ARENOSO		
• LLANA (2 %)	0,05	0,10
• MEDIANAS (2 % - 7 %)	0,10	0,15
• INCLINADAS (≥ 7 %)	0,15	0,20
AREAS DE SUELO PESADO		
• LLANA (2 %)	0,13	0,17
• MEDIANAS (2 % - 7 %)	0,18	0,22
• INCLINADAS (≥ 7 %)	0,25	0,35

Figura 1. Coeficientes de escorrentía según tipo de área y tipo de superficie. [9]

Tabla 2. Coeficiente de escorrentía ponderado para cada área de aportación definida.

Estación	Nombre	Parroquia	Coef. Escorrentía Ponderado
C18	Puengasí	Itchimbía	0,68
P20	Calderón Tanque	Calderón	0,64
P56	Solanda	La Argelia	0,76

2.1.6. Área de Aportación

Se define como el área total de la cuenca de estudio, su valor es directamente proporcional al valor del caudal pluvial pico, debido a que, a mayor área de aportación, mayor será el caudal de diseño. Según la consideración del método racional, en el área de aportación se desarrolla una precipitación constante, la misma que, desemboca en un punto.

Para el presente estudio se definieron tres áreas de aportación de manera estimativa para cada zona de interés en el sur, centro y norte de la capital, con ayuda de Google Earth, partiendo de las coordenadas de las estaciones hidrológicas de interés otorgadas por la empresa EPMAPS (P20 Calderón, P56 Tanque Solanda, C18 Puengasí). Como el objetivo es la estimación de caudales pico de descarga en puntos estratégicos de la ciudad y, a través de rápidas escalonadas, como estructuras de disipación, restituir estos caudales, se consideró, como punto de descarga, el punto más bajo del área de aportación definida que colinde con una quebrada.

Tomando en cuenta las limitaciones del método racional para áreas mayores a 5 km², en este caso se definieron áreas de aportación que varían desde 1 km² a 2 km² para evaluar el prediseño en función de distintas cuencas hidrográficas.

Tabla 3. Área de aportación para cada zona de interés.

Estación	Nombre	Parroquia	Área (Km2)
C18	Puengasí	Itchimbía	1,82
P20	Calderón Tanque	Calderón	2,00
P56	Solanda	La Argelia	1,10

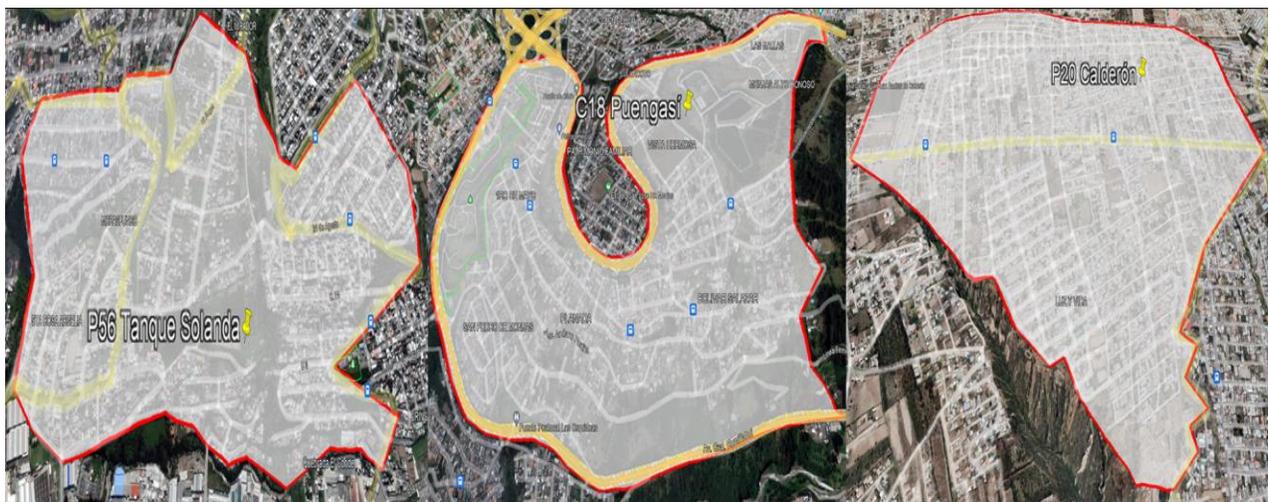


Figura 2. Áreas de aportación definidas para cada estación de interés extraídas de Google Earth. Autores.

2.1.7. Pendiente del Terreno

Es un dato fundamental para el prediseño de las rápidas escalonadas propuestas, debido a que la disposición de la estructura y el cálculo de las dimensiones de los escalones están en función de la pendiente del terreno. La finalidad de la disposición de la estructura es que la pendiente de la rápida escalonada propuesta sea lo más similar a la del terreno, esto para evitar encarecer los costos de excavación.

Para el presente estudio, siendo ya delimitadas las áreas de aportación para las zonas de descarga de interés, se calcularon las pendientes del terreno tomando como punto de partida el desemboque de la cuenca hidrográfica delimitada y como punto

final el inicio de la quebrada colindante a la que se desea conducir el caudal de flujo. Esto se realiza mediante la herramienta Google Earth, la cual permite visualizar el perfil de elevación de una ruta definida y con el uso de la siguiente ecuación:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta H}{L}\right) \quad (3)$$

Donde:

θ = Pendiente del terreno (Grados)

ΔH = Variación de altura en la ruta definida (m)

L = Longitud de desarrollo de la ruta definida (m)

La pendiente del terreno es un dato fundamental para el desarrollo óptimo del flujo rasante (skimming flow), por tal motivo, se han

seleccionado estratégicamente las zonas hidrológicas con mayor pendiente para el estudio.

Tabla 4. Pendientes de las quebradas de descarga de estudio para cada área de aportación.

Estación	Parroquia	Zona	Pendiente "Grados"
C18	Itchimbía	Centro	23
P20	Calderón	Norte	23
P56	La Argelia	Sur	21

2.2. Prediseño de las Propuestas de Rápidas Escalonadas

2.2.1. Concepto de Rápidas Escalonadas

Los canales con fondo escalonado, o también llamados rápidas escalonadas, son estructuras hidráulicas cuya geometría y disposición permite, no solo la colección y conducción de caudales, sino también una considerable disipación de energía de flujo mediante la relación agua-aire que se produce en cada escalón (Flujo bifásico), en comparación con sus similares de fondo liso. Estos canales escalonados pueden formar parte de una red de sistemas de obras hidráulicas en una zona de interés, y se utilizan principalmente en lugares de alta erosión fluvial, con pendientes considerables y con caudales picos de flujo. [2]

Si bien, este canal presenta una innovación en el campo de la Hidráulica debido a su geometría y su disposición, el mismo ya se ha usado a lo largo de toda la historia. Así lo menciona Khatsuria [3]:

Contrariamente a la creencia de que el uso de canales escalonados para la disipación de energía es un nuevo concepto, los conductos escalonados se han utilizado desde la antigüedad. Los canales escalonados fueron diseñados para contribuir a la estabilidad de las estructuras y para disipar energía de flujo.

2.2.2. Rápidas Escalonadas con Flujo Rasante "Skimming Flow"



Figura 3. Régimen de flujo rasante en vertederos escalonados. Autores.

La rápidas escalonadas tienen como finalidad la disipación energía y disminuir la velocidad del flujo aguas abajo, tal como se menciona anteriormente. Para condiciones de flujo rasante el agua fluye sobre las esquinas externas de las escaleras como una napa sobre un pseudo-fondo, produciéndose una recirculación del agua en la parte interna del escalón, lo que se conoce como vórtices de flujo. [2]

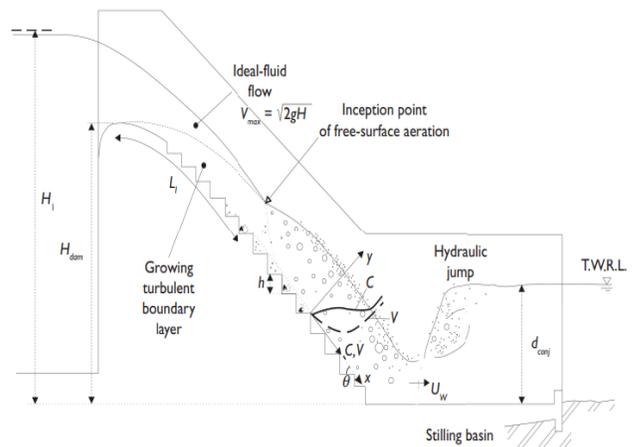


Figura 4. Desarrollo del flujo rasante en una rápida escalonada. [2]

Según el Instituto Nacional de Vías de Colombia [10] "La reducción de energía en rápidas escalonadas con flujo rasante se da, entonces, por la recirculación de agua en el escalón y por el

impacto del flujo en el escalón aguas abajo”.

Para este tipo de régimen, el comportamiento del flujo está totalmente ligado al tipo de descarga y a las dimensiones de los escalones.

Mediante al análisis de un gran número de observaciones experimentales en escalones horizontales planos desarrollados por Chanson [2] se obtuvieron diferentes puntos que se correlacionan entre sí, sugiriendo que el límite superior del flujo rasante es a través de la siguiente gráfica y ecuación:

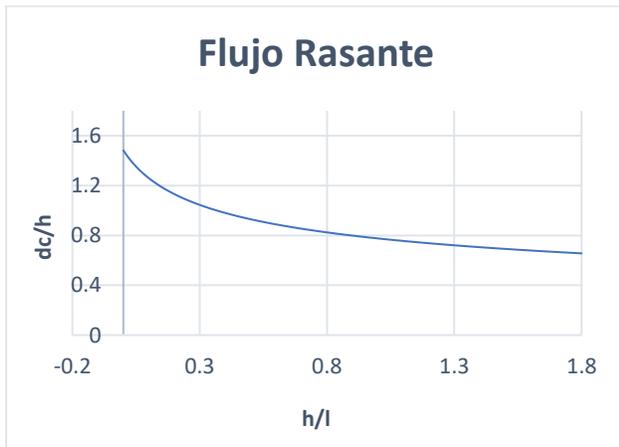


Figura 5. Condiciones de flujo rasante. Autores basados en Chanson. [2]

$$\frac{d_c}{h} = \frac{0.881}{\left(\frac{h}{l} + 0.149\right)^{0.317}} \quad (4)$$

Donde:

d_c = Calado Crítico (m)

q_w = Caudal Unitario (m^2/s)

h = Contrahuella del escalón (m)

l = Huella del escalón (m)

El calado crítico “ d_c ” está en función del caudal unitario y el mismo depende del ancho de la rápida “ b ”, a su vez, su valor no varía en función de la pendiente de la estructura. Por lo tanto, el ancho de la rápida es un valor muy importante a considerar, puesto que puede cambiar la configuración de los escalones para el cumplimiento del flujo rasante.

$$q_w = \frac{Q}{b} \quad (5)$$

$$d_c = \left(\frac{q_w^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

Se dispone, como datos in situ, tanto la pendiente del terreno como la descarga en el punto que colinda el área de aportación con la quebrada definida para cada zona.

La ecuación (4), se despeja en función de la huella de escalón (l), realizando iteraciones con el ancho (b) y contrahuella (h) de la rápida escalonada hasta que la misma cumpla o se aproxime a la pendiente del terreno.

$$l = \left(\frac{h}{\left(\frac{h \times 0.881}{d_c}\right)^{\frac{1000}{317}} - 0.149} \right) \quad (4.1)$$

Donde:

l = Huella del escalón (m)

d_c = Calado Crítico (m)

h = Contrahuella del escalón (m)

2.2.3. Número de Froude

Según Ven Te Chow [11] “Es la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales”. Para el flujo de interés (Flujo Rasante), está definido en función de la altura de rugosidad del escalón mediante la siguiente expresión:

$$F_* = \frac{q_w}{\sqrt{g * \sin(\theta)(h * \cos(\theta))^3}} \quad (7)$$

Donde:

F = Número de Froude

q_w = Caudal Unitario (m^2/s)

g = Gravedad (m/s^2)

h = Contrahuella del Escalón (m)

2.2.4. Punto de Inicio de la Aireación “Punto de Incepción”

Al inicio de la rápida escalonada el flujo es relativamente suave, por ende, en los primeros escalones no se observa el desarrollo del flujo aireado. Mientras transcurre el flujo por los escalones, la velocidad de flujo aumenta

considerablemente debido a la pendiente de la estructura y su disposición, produciéndose el flujo bifásico necesario para la disipación de energía y observándose vórtices de aire-agua que se producen en cada escalón, esto se denomina aireación en el flujo y el punto en el que empieza a desarrollarse este fenómeno se denomina Punto de Incepción. [2]

Según Chanson [2] “En el caso de un vertedero escalonado no controlado, la localización del punto de inicio de la aireación en superficie libre puede derivarse a partir de una expresión semi analítica del desarrollo de la capa limite turbulenta”.

$$\frac{L_{Iuc}}{h \times \cos \theta} = 9.719 \times (\sin \theta)^{0.0796} \times F_*^{0.713} \quad (8)$$

$$L_{Iuc} = 9.719 \times (\sin \theta)^{0.0796} \times F_*^{0.713} \times h \times \cos \theta \quad (8.1)$$

Donde:

L_I = Es la distancia en sentido de la corriente desde la cresta (m)

Uc = Nomenclatura que indica una cresta sin control

F = Número de Froude

h = Contrahuella del escalón (m)

De la misma forma el autor Chanson [2] en la expresión (9) define un tirante d_{Iuc} que representa un tirante de agua en el punto de incepción:

$$\frac{d_{Iuc}}{h \times \cos \theta} = 0.4034 \times \frac{F_*^{0.592}}{(\sin \theta)^{0.04}} \quad (9)$$

$$d_{Iuc} = 0.4034 \times \frac{F_*^{0.592}}{(\sin \theta)^{0.04}} \times h \times \cos \theta \quad (9.1)$$

2.2.5. Resistencia de Flujo

La resistencia en el flujo rasante está asociada a considerables pérdidas de forma y transferencia de momento entre el flujo principal y la recirculación de la cavidad de paso. [2]

En la figura (6) se presenta un análisis de los datos de resistencia al flujo desarrollados en laboratorio y en el prototipo según el autor Chanson, reagrupando 249 puntos de datos, los

cuales están en función de la altura adimensional de la cavidad [2]. El promedio de todos estos datos se define con una línea recta, la misma que representa el factor de fricción f como una constante de valor 0.18 a considerar. Los resultados obtenidos de observaciones experimentales recomiendan un factor k igual a 6.

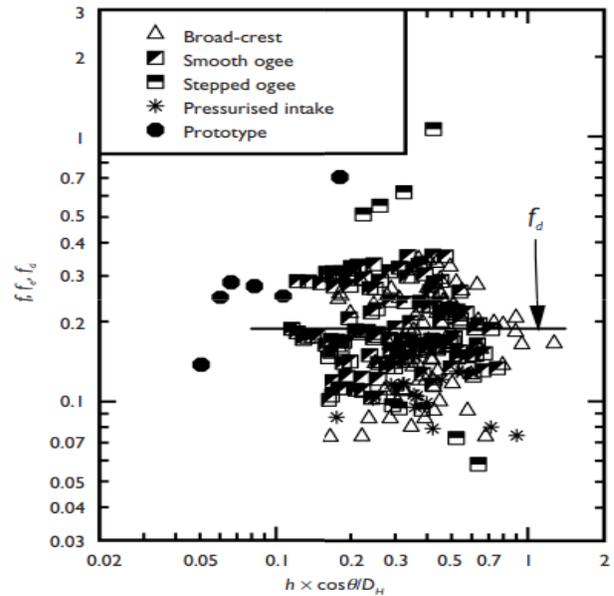


Figura 6. Datos de resistencia de flujo desarrollados en laboratorio. [2]

$$f_d = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \times \frac{1}{k} \quad (10)$$

Donde:

F_d = Resistencia de flujo

$\frac{1}{k}$ = Índice de expansión de la capa de cizallamiento

2.2.6. Disipación de Energía

En las obras hidráulicas, los disipadores de energía tienen como función disminuir la energía cinética del flujo para evitar grandes presiones que se traduzcan en la socavación del canal aguas abajo. [12]

La intención de los disipadores de energía, mediante las estructuras escalonadas propuestas, es disminuir notoriamente la energía máxima H_{max} existente en el sistema por impacto y recirculación del flujo (vorticidad). Como no toda la energía existente se disipa, existirá una energía remanente

al pie de la estructura H_{res} que deberá ser disipada con estructuras complementarias.

2.2.6.1) Energía Máxima

La energía máxima que se desea disipar está en función de la altura total de la estructura escalonada H_{dm} y el calado crítico desarrollado aguas arriba multiplicado por un factor. Chanson [2] define la energía máxima mediante la siguiente expresión:

$$H_{max} = H_{dm} + 1.5 \times d_c \quad (11)$$

Donde:

H_{max} = Energía Máxima (m)

H_{dm} = Altura de la Rápida Escalonada (m)

d_c = Calado Crítico (m)

2.2.6.2) Energía Residual

En el régimen de flujo rasante que suele considerarse para el diseño de rápidas escalonadas, se observa una fuerte transferencia de momento que consume energía entre el flujo de la cavidad escalonada y la masa de agua de la rasante. [2]

Como se menciona previamente, existe una energía remanente al pie de la estructura, que según Chanson [2] se obtiene con la siguiente relación:

$$\frac{H_{res}}{H_{max}} = \frac{\left(\frac{f}{8 \times \sin \theta}\right)^{1/3} + \frac{\alpha}{2} \times \left(\frac{f}{8 \times \sin \theta}\right)^{-2/3}}{\frac{3}{2} + \frac{H_{dm}}{d_c}} \quad (12)$$

Donde:

H_{res} = Energía residual (m)

H_{max} = Energía Máxima (m)

H_{dm} = Altura de la Rápida Escalonada (m)

d_c = Calado Crítico (m)

α = Factor de corrección de la energía cinética que toma el valor de 1.1 según el autor Matos [13]

f = Factor de fricción

2.2.6.3) Porcentaje de Disipación de Energía

Para determinar el porcentaje de energía que disipa la rápida escalonada, se realiza una simple relación

entre la variación de energías desarrollada a lo largo de la estructura, dividida para la energía máxima y multiplicada por 100%.

$$\% \text{ Disipación Energía} = \frac{H_{max} - H_{res}}{H_{max}} \times 100\% \quad (13)$$

2.2.7. Arrastre de Aire

La turbulencia que actúa junto a la superficie libre incluye una importante auto aireación, lo que induce a un cierto abultamiento del flujo, por lo que se requiere paredes laterales del vertedero, las cuales evitan que el flujo se desemboque fuera de la estructura y al mismo tiempo evita los daños por cavitación. [2]

Si el vertedero es lo suficientemente largo para que el flujo alcance un equilibrio uniforme, la profundidad equivalente del flujo de aguas claras se deriva de las condiciones de momento. Según Chanson [2]:

$$d = \sqrt[3]{\frac{f \times q_w^2}{8 \times g \times \sin \theta}} \quad (14)$$

Donde:

d = Calado de aguas claras (m)

f = Factor de fricción

q_w = Caudal Unitario (m^2/s)

g = Gravedad (m/s^2)

Se deberá tomar en cuenta que la concentración de aire promedio en la profundidad (C_{mean}) puede aumentar hasta más del 50% en la región de flujo completamente desarrollado [2]. Para las paredes laterales se debe tomar como altura de aeración la siguiente expresión:

$$Y_{90} = \frac{d}{1 - C_{mean}} \quad (15)$$

Donde:

Y_{90} = Calado de flujo aireado al pie de la rápida escalonada (m)

d = Calado de aguas claras (m)

C_{mean} = Factor de concentración de aire (%)

Khatsuria [3] para el cálculo del valor de C_{mean} recomienda:

En el año 2000 se realizó estudios experimentales en un vertedero plano de 15

m de altura ($\theta = 26,6^\circ$) colocado con bloques de hormigón de 5 cm de altura. Sus mediciones dieron una relación para el factor C aguas abajo del punto de inicio.

Se obtuvo la siguiente ecuación:

$$C_{mean} = 0.23 + 0.017 \left(\frac{L - L_I}{d_I} \right)^{0.46} \quad (16)$$

Donde:

- C_{mean} = Factor de concentración de aire (%)
- L = Distancia medida a lo largo del vertedero (m)
- L_I = Distancia en sentido de la corriente desde la cresta hasta el punto de aireación (m)
- d_I = Profundidad de flujo en el inicio de la rápida escalonada (m)

2.2.8. Velocidad de Flujo

Al existir aireación, la velocidad al pie de la rápida escalonada que se denomina U_w va a disminuir. Para encontrar esta variable se utiliza la gráfica 7 desarrollada por el autor Chanson [2], la cual representa la relación entre H_{max}/d_c y U_w/V_{max} , donde V_{max} es un valor de velocidad empírico obtenido considerando una igualdad de energía al inicio y al final de la rápida. Por lo tanto, la velocidad máxima se obtiene de la ecuación:

$$V_{max} = \sqrt{2 \times g \times (H_{max} - d \times \cos \theta)} \quad (17)$$

Donde:

- V_{max} = Velocidad máxima de flujo al extremo de la rápida escalonada
- H_{max} = Energía Máxima (m)
- d = Calado de aguas claras (m)
- g = Gravedad (m/s^2)

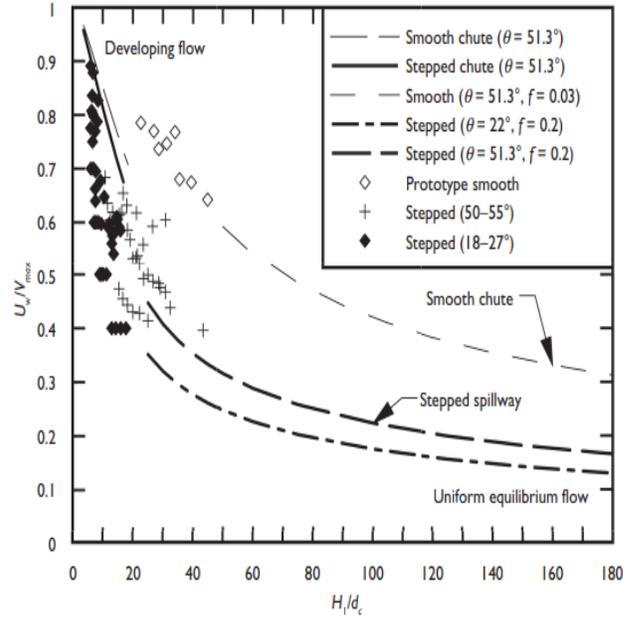


Figura 7. Velocidad desarrollada al pie de rápida escalonada. [2]

2.2.9. Cresta al Inicio de la Rápida Escalonada

La topografía de los terrenos de Quito es considerablemente irregular, y sus pendientes pronunciadas provocan que al inicio de la rápida escalonada el flujo se desarrolle de manera inestable, para evitar esto se realiza una cresta al inicio de la estructura, la misma que se dispone con la función de evitar la tendencia del flujo a separarse del suelo.

Para el diseño de la cresta, se consideró como condiciones iniciales un flujo subcrítico aguas arriba. Los cálculos de flujo en desarrollo y de flujo uniforme en equilibrio pueden combinarse para obtener una tendencia general, que puede utilizarse para un diseño preliminar.

Según el estudio [14] se define la siguiente expresión:

$$-y = x \tan \theta + \frac{x^2}{K[4(d + h_v) \cos^2 \theta]} \quad (18)$$

Para garantizar una presión positiva a lo largo de toda la superficie de contacto de la curva, K debe ser igual o superior a 1,5. [14]

2.3. Modelación Numérica de las Propuestas de Rápidas Escalonadas mediante el Software FLOW 3D.

2.3.6. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

Es el conjunto de herramientas tecnológicas que permite resolver las ecuaciones diferenciales de la mecánica de fluidos (Ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía), discretizando y linealizándolas hasta obtener un sistema de ecuaciones algebraico.

Fernández [15] introduce una pequeña reseña de la historia de las ecuaciones de Navier-Stokes que se resuelven en el CFD, la cual menciona: "... las ecuaciones de la Mecánica de Fluidos quedaron formuladas por Claude Navier (1785-1836) y George Stokes (1819-1903) cuando introdujeron los términos de transporte viscoso a las ecuaciones de Euler (1707-1783), dando lugar a las ecuaciones de Navier-Stokes".

Las ecuaciones desarrolladas por Navier-Stokes son la base para la simulación numérica CFD, las cuales incluyen intrínsecamente las leyes de conservación para la masa, la cantidad de movimiento y la energía de un flujo, de la siguiente manera:

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (19)$$

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (20)$$

$$\rho \frac{dE}{dt} + \rho \nabla \cdot (\vec{v}E) = -\nabla \cdot (K\nabla T) + \rho \vec{g} \cdot \vec{v} + \nabla \cdot (\vec{\sigma} \cdot \vec{v}) + \dot{W}_f + \dot{q}_H \quad (21)$$

Para resolver las ecuaciones mencionadas se necesitan métodos numéricos avanzados y computadores. Para este caso el Software a utilizar será FLOW 3D[5] que resuelve las ecuaciones de movimiento de fluidos con métodos numéricos avanzados, como es el método Volume of Fluid (VOF). [16]

2.3.7. Ecuaciones RANS

La turbulencia se desarrolla cuando el fluido se comporta de una forma caótica. En este estado la simulación del flujo se complica debido a las fluctuaciones, por lo tanto, éstas se acoplan mediante las ecuaciones RANS. Según Fernández [15]:

En la aproximación RANS se introduce un promedio temporal a las variables con el objeto de separar el valor medio de la parte fluctuante. Para que esta operación tenga sentido estadístico y físico, el tiempo de promedio tiene que ser mucho más grande que el período característico de las fluctuaciones turbulentas de la escala integral.

2.3.8. Modelo de Transporte de Turbulencia RNG

La simulación CFD se basa en las ecuaciones de Navier-Stokes, pero para fenómenos como la turbulencia es necesario un mallado más fino, lo que con lleva a un gran costo computacional. Por lo tanto, se realiza un modelo de ecuaciones que nos permitan resolver de mejor manera la turbulencia.

En este caso, el modelo RNG es utilizado en el Software FLOW 3D, el cual se presenta como un modelo que tiene una aplicabilidad más amplia que $k - \epsilon$, se sabe que el modelo RNG describe con mayor precisión los flujos de turbulencia de baja intensidad y los flujos con fuertes regiones de cizalladura. [4]

2.3.9. Mezcla Agua-Aire en la Simulación en FLOW 3D

Como ya es de conocimiento, el flujo rasante desarrolla en cada escalón una especie de mezcla de agua y aire, lo que produce la disipación de energía. Para esto el programa Flow 3D utiliza un método de estudio llamado Drif-Flux Model que intenta simular el fenómeno de aireación en la modelación numérica.

El manual de uso otorgado por el Software FLOW 3D[5] nos dice lo siguiente: "La idea detrás del modelo Drift es que el movimiento relativo

entre los componentes se puede aproximar como un continuo, en lugar de elementos discretos”.

2.3.10. Discretización Espacial

La discretización espacial es el cambio de un dominio continuo a dominio discreto que tiene la finalidad de crear una malla de análisis y en cada nodo de la misma se van a encontrar las variables del flujo (presión, velocidad, temperatura). Para el estudio en concreto se decidió un mallado de 0.15 cm, de tal forma que se puedan evidenciar fenómenos de manera clara, sin aumentar considerablemente el costo computacional.

A su vez, para favorecer la discretización del modelo, se necesita el uso de la herramienta *Overlap*, la cual tiene como función colocar un mallado específico entre el límite del sólido y el fluido con el objetivo de disminuir el tamaño de mallado de estudio y, por ende, reducir considerablemente el costo computacional. Para la presente investigación se definió un valor de *Overlap* de 2.6 m en las tres rápidas escalonadas de estudio.

2.3.11. Condiciones de Borde

La simulación se realiza en tres dimensiones debido a la necesidad de evaluar el mayor número de fenómenos que se desarrollen en la estructura, principalmente se desea evidenciar la conducta de las ondas de flujo momento de la aireación y la disipación de energía en cada escalón.

Las Condiciones de Borde permiten delimitar las zonas de análisis y de interés, las cuales se deben colocar correctamente para todo el campo hidrodinámico, de tal forma que no exista una desconfiguración de estabilidad y, por ende, soluciones erróneas.

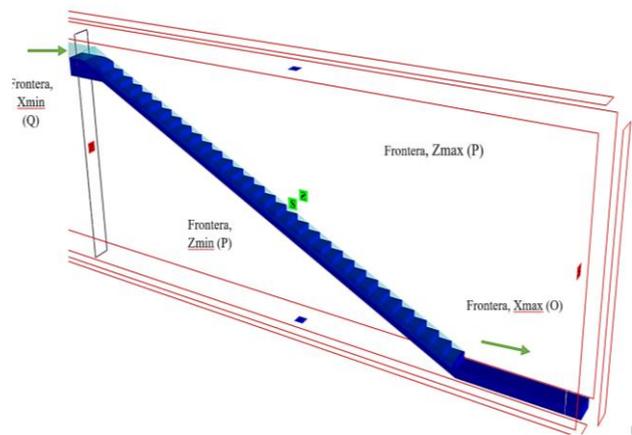


Figura 8. Regiones para la modelación. Autores.

En la frontera X_{\min} (Q) se coloca la condición de velocidad de entrada y tirante para simular el caudal pluvial pico que ingresa a la estructura.

En la frontera X_{\max} (O) se delimita la condición de salida del flujo (Outflow).

En la frontera Z_{\max} (P) se fija la condición “abierto”, de tal forma que se muestre el desarrollo de la presión atmosférica por encima del flujo.

En las fronteras Y_{\min} , Y_{\max} y Z_{\min} se colocan las condiciones de pared, de tal forma que se limite el alto y el ancho de la estructura.

2.3.12. Parámetros Iniciales en el programa FLOW 3D

Se definen los parámetros iniciales y físicos, de tal forma que se desarrolle de manera eficaz el estudio de la simulación numérica del flujo rasante sobre las rápidas escalonadas modeladas. Parámetros tales como:

Parámetros Iniciales

- Tiempo de simulación: 33,8 segundos Calderón, 69,5 segundos Puengasí, 40 segundos Tanque Solanda.
- Fluido incompresible
- Flujo a superficie libre
- Fluido: Aguas a 20°C
- Unidades: Sistema Internacional
- Temperatura: Celsius
- Condición inicial de borde que considere agua existente en los escalones para la óptima simulación de la recirculación del flujo escalón-escalón

Parámetros Físicos

- Gravedad $Z = -9.81 \text{ m/s}^2$
- Viscosidad y turbulencia
- Incorporación y transporte de aire
- Modelo RNG
- Coeficiente de arrastre de aire = 0.5

3. Resultados y Discusiones

3.1. Estaciones y Caudales de las Quebradas de la Ciudad de Quito

Se seleccionaron estratégicamente tres estaciones de estudio (Tanque Solanda, Puengasí y Calderón) para datos históricos de precipitaciones con periodos de retorno de 20 años y se definieron sus áreas de aportación, así como las pendientes de sus respectivas quebradas colindantes mediante el programa Google Earth. Cada una en representación de las zonas sur, centro y norte de la capital.

Por lo tanto, definidas las áreas de aportación de cada cuenca, los coeficientes de escorrentía ponderado para cada área y los datos de intensidad otorgados, mediante la ecuación (1) se obtienen los caudales máximos correspondientes:

Tabla 5. Coeficiente de escorrentía ponderado, área de aportación y caudal pluvial máximo para las estaciones de estudio.

Estación	Coef. Escorrentía Ponderado	Área (Km ²)	Caudal Máximo (m ³ /s)
C18	0,68	1,82	11,714
P20	0,64	2,00	12,347
P56	0,76	1,10	6,827

3.2. Dimensiones de las Rápidas Escalonadas Propuestas

Para el prediseño de las rápidas escalonadas se consideró limitar las alturas y longitud de desarrollo de las mismas con la finalidad de reducir el costo computacional, por ende, se propuso que las alturas de las rápidas escalonadas oscilen entre 25 hasta 35 metros, aunque en campo se definieron alturas de más de 80 metros desde el punto de desemboque hasta la quebrada colindante. A su

vez, también se propuso que el ancho de las estructuras varíe entre 2.5 a 3.5 metros.

A través del análisis teórico desarrollado en hojas de cálculo y mediante la ecuación (4.1), se determinaron las dimensiones de los escalones para cada rápida de estudio y se desarrollaron las diferentes comprobaciones que confirmen el cumplimiento de flujo rasante en cada estructura.

Se obtuvieron así, las siguientes dimensiones:

Tabla 6. Dimensiones de las rápidas y sus escalones.

Estación	Calderón - Calderón	Puengasí - Itchimbía	Tanque Solanda - LaArgelia
Pendiente	23	23	21
Altura H (m)	30	35	25
Largo L (m)	70,68	82,45	65,13
Huella h (m)	2,65	2,30	2,20
Contrahuella l (m)	1,15	1	0,85
Ancho b (m)	3	3,5	2,5

Como se puede observar, no existe una diferencia considerable entre las pendientes de las tres rápidas escalonadas. Se deduce así que las dimensiones de cada rápida serán directamente proporcionales al valor de su caudal de diseño. Por lo mencionado, las dimensiones de los escalones, tanto en huella como en contrahuella, sí varían para cada estructura.

3.3. Condiciones Iniciales

Para el diseño de la cresta al inicio de la rápida escalonada e ingresar los datos iniciales de la descarga en el diseño CFD, se consideró: flujo tipo subcrítico al inicio, pendiente de 0.001 m/m y coeficiente de Manning de 0.01.

Para la cresta se trabaja en sistema de unidades EE.UU. A su vez, para una mejor precisión y avance del estudio, se utilizó el programa H CANALES para calcular la velocidad inicial de flujo y el tirante inicial de flujo.

Tabla 7. Condiciones iniciales y datos para el diseño de cresta.

Estación	Calderón - Calderón	Puengasí - Itchimbía	Tanque Solanda - La Argelia
Q (m³/s)	12,347	11,71	6,827
Ancho b (m)	3	3,5	2,5
Tirante Normal (m)	1,56	1,29	1,19
Número de Froude	0,68	0,73	0,66
Velocidad (m/s)	2,6429	2,5933	2,279

Con estos datos se puede realizar el diseño de la cresta al inicio de rápida escalonada y, de igual forma, se considera el tirante normal y la velocidad inicial como datos fundamentales para la simulación computacional en la región preliminar.

3.4. Modelo Numérico

Con la obtención de las condiciones iniciales y con el cálculo de las dimensiones de los escalones, se diseñaron los sólidos de cada estructura en AutoCAD y se las ingresaron con los siguientes parámetros al programa FLOW 3D:

Tabla 8. Tiempo y Tamaño de celdas para la simulación.

Estación	Calderón - Calderón	Puengasí - Itchimbía	Tanque Solanda - LaArgelia
Tiempo Simulación (s)	33,8	69,5	40
Tamaño de Celda (cm)	15	15	15

Como se mencionó previamente, se utilizó un tamaño de mallado de 0.15 cm para evaluar todos los fenómenos de flujo desarrollados. A su vez, para definir el tiempo de simulación se evalúa si el flujo ya se encuentra permanente, y se detiene la simulación.

3.5. Resultados: Análisis Semiempírico vs Modelación Numérica

En el presente ítem se comparan los resultados obtenidos mediante las respectivas hojas de cálculo desarrolladas en Mathcad según la bibliografía de Chanson, con las gráficas obtenidas de las modelaciones numéricas correspondientes utilizando el Software FLOW 3D.

3.5.1. Calado Crítico

El calado crítico teórico se determina con la ecuación (6). Por su parte, en la simulación numérica se encuentra al inicio de la cresta, antes de que el flujo se desarrolle por la estructura. Se obtiene:

Tabla 9. Calado Crítico en Mathcad vs Flow 3D.

Estación	MATHCAD y_c (m)	FLOW 3D y_c (m)
Calderón – Calderón	1,2	1,18
Puengasí – Itchimbía	1,045	1,07
Tanque Solanda - La Argelia	0,913	0,78

3.5.2. Inicio de la aireación

En el estudio analítico, el inicio de la aireación se encuentra a través de la longitud de la cresta, con la ecuación (8.1). Mientras que, en la simulación por el programa Flow 3D, se puede identificar visualmente el escalón en el que inicia la fracción de volumen de aire arrastrado. Se determina así lo siguiente:

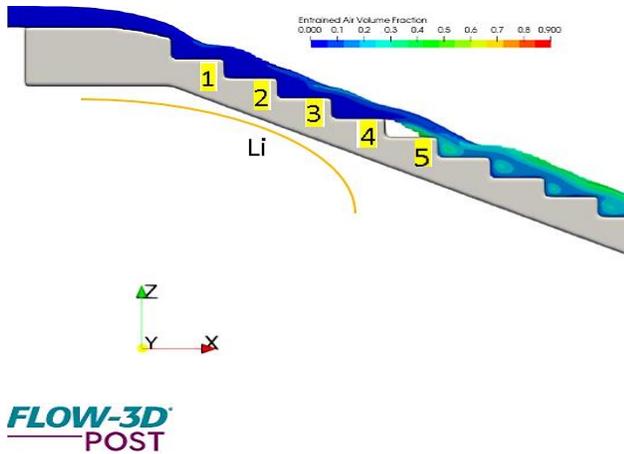


Figura 9. Inicio de la aireación FLOW-3D. Puengasí – Itchimbia.

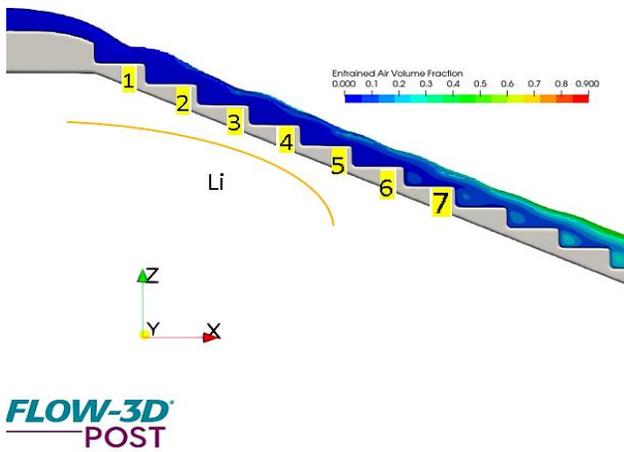


Figura 10. Inicio de la aireación FLOW-3D. Calderón – Calderón.

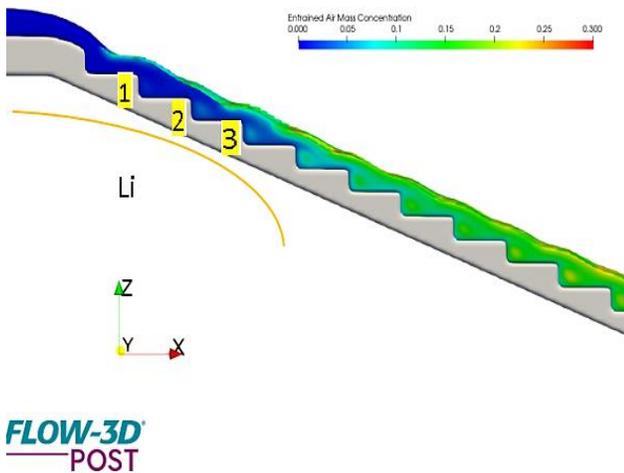


Figura 11. Inicio de la aireación FLOW-3D. Tanque Solanda – La Argelia.

Tabla 10. Escalón de inicio de aireación en Mathcad vs Flow 3D.

Estación	MATHCAD Li (m)	FLOW 3D
Calderón – Calderón	15.26 (grada 8)	grada 9
Puengasí – Itchimbia	13.22 (grada 6)	grada 5
Tanque Solanda - La Argelia	11.88 (grada 9)	grada 3

En las rápidas de Calderón y Puengasí la diferencia del desarrollo de la aireación es mínima, prácticamente de una grada. Mientras que, en la rápida de Tanque de Solanda, existe una gran diferencia de más de 5 gradas entre lo teórico y la simulación numérica. Se deduce que esto se debe a que el caudal captado por la rápida de Solanda es considerablemente menor que sus similares de Puengasí y Calderón, y, por ende, numéricamente se demora más en desarrollarse el flujo bifásico en la estructura.

3.5.3. Descarga

El valor del caudal pluvial de diseño se obtuvo a través de método racional, con la ecuación (1). Mientras que para la simulación numérica se obtuvo por condiciones iniciales, ingresando los datos de velocidad inicial y tirante normal obtenidos en la tabla 5. Se debe entonces demostrar que el caudal teórico y el numérico es similar.

Tabla 11. Caudal en Mathcad vs Flow 3D. Calderón – Calderón.

	MATHCAD	FLOW 3D
Caudal (m3/s)	12,347	12,33
Caudal unitario (m2/s)	4,12	4,11

Tabla 12. Caudal en Mathcad vs Flow 3D. Puengasí – Itchimbía.

	MATHCAD	FLOW 3D
Caudal (m3/s)	11,71	11,96
Caudal unitario (m2/s)	3,35	3,42

Tabla 13. Caudal en Mathcad vs Flow 3D. Tanque Solanda– La Argelia.

	MATHCAD	FLOW 3D
Caudal (m3/s)	6,827	7,31
Caudal unitario (m2/s)	2,73	2,92

Existe una variación mínima de los caudales calculados por el método racional y los desarrollados en la modelación computacional. De forma que, se obtienen resultados diferentes en calado crítico, caudal unitario y número de Froude.

3.5.4. Porcentaje de Aireación

Según la investigación realizada, se encontró que, para determinar las paredes de una rápida escalonada, es necesario encontrar el 90% de la mezcla de agua-aire en el flujo. El programa Flow 3D otorga las gráficas en donde se localiza el flujo a 90% de aireación.

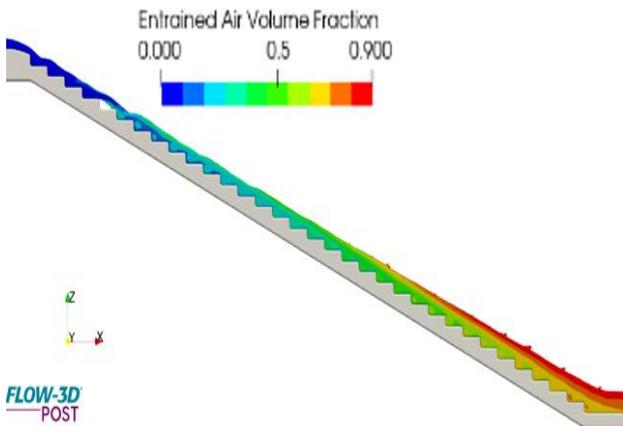


Figura 12. Concentración de arrastre de aire al 90% FLOW 3D. Puengasí – Itchimbía.

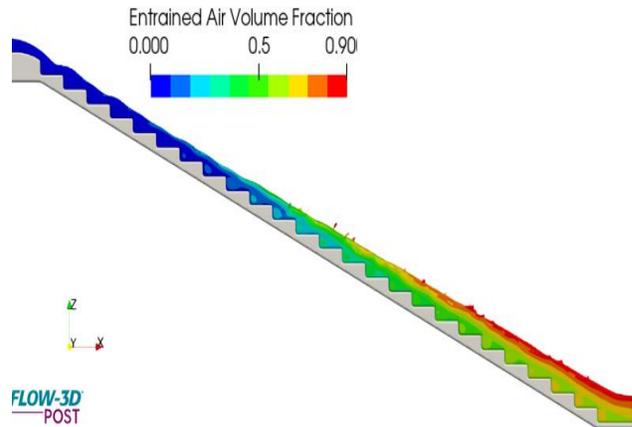


Figura 13. Concentración de arrastre de aire al 90% FLOW 3D. Calderón – Calderón.

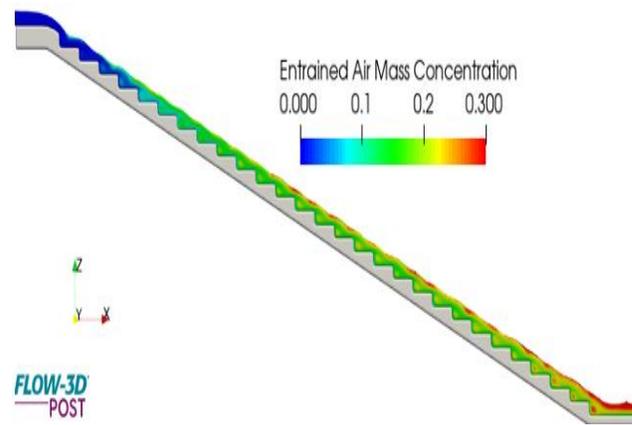


Figura 14. Concentración de arrastre de aire al 90% FLOW 3D. Tanque Solanda – La Argelia.

En las figuras 12 y 13 se puede observar que las rápidas de Puengasí y Calderón cumplen con el 90% de aireación en flujo, mientras que en la rápida de Tanque Solanda solo se llega a cumplir el 30%, por lo que se considera no cumple la aireación del 90% debido al caudal limitado desarrollado en la rápida, y, por ende, el flujo bifásico no se forma en su totalidad.

3.5.5. Calado de Aguas Claras “d”

Se determina el calado de aguas claras con la ecuación (14) y el factor de fricción $f=0.18$, o según la figura 6 y la ecuación (10). Mientras que, en la simulación, se seleccionan los valores de profundidad normal de flujo y perpendicular al flujo al inicio de cada rápida escalonada previo a la

aireación.

La diferencia entre los calados de aguas claras teórico-numérico, presentes en la tabla 14, es bastante considerable. Se observa que los valores obtenidos en Flow 3D superan los 60 centímetros a los valores calculados con la ecuación (14).

3.5.6. Calado de Mezcla Aguas-Aire “y₉₀”

El cálculo del calado de mezcla agua-aire se realiza con la ecuación (15), para esto, es necesario disponer el valor de calado de aguas claras, el factor de fricción $f = 0.18$ o según la figura 6, y la ecuación (10). Por su parte, el valor del factor de aireación C_{mean} se lo encuentra con la ecuación (16). Mientras que, en la simulación numérica, se toman los valores de la profundidad de flujo al final de rápida escalonada donde se encuentra el 90% de aeración.

La diferencia entre los calados de mezcla aguas-aire semiempíricos y los obtenidos mediante la simulación es bastante considerable, tal como se evidencia en la tabla 14. Se observa que los valores obtenidos en Flow 3D superan valores calculados teóricamente por lo que se considera una mayor aireación en la modelación que en la teoría.

3.5.7. Número de Froude

El número de Froude para un flujo rasante se determina mediante la ecuación (7). Mientras que para la simulación numérica se extrajeron los valores de Número de Froude en la tabla 14 y se compara.

Se obtienen valores de Número de Froude teórico-numérico muy similares, indicativo de que el flujo que se desarrolla en la estructura similar tanto en el análisis teórico como en la simulación numérica.

A su vez, al ser los números de Froude calculados, mayores a la unidad, podemos corroborar la formación de un flujo super crítico que alcanza una lámina cuasi uniforme al pie de la rápida.

3.5.8. Velocidad al Pie de la Rápida Escalonada

Para el cálculo teórico, se procede a determinar la velocidad máxima V_{max} con la ecuación (17), y mediante la relación de energía máxima y calado crítico se ingresa a la figura 7, para encontrar el valor de la relación U_w / V_{max} , y luego despejar U_w , valor que representa la velocidad al pie de la rápida. Mientras que, para la simulación CFD, se realiza un promedio de los resultados de velocidades al pie de rápida escalonada en la dirección de flujo.

Evidentemente las velocidades al pie de la rápida escalonada varían, tal como se puede corroborar en la tabla 14. Para las rápidas escalonadas de Puengasí y Calderón, donde el flujo se forma totalmente y se logra una aireación del 90% la velocidad numérica al pie de la rápida es considerablemente mayor a la teórica. Mientras que, para la rápida de Tanque Solanda, donde no se desarrolla el flujo en su totalidad, la velocidad teórica es superior a la numérica.

3.5.9. Disipación de Energía

El porcentaje de disipación de energía se determina con ecuación (13). Para esto, se necesita la energía máxima y la energía residual calculadas mediante las ecuaciones (11) y (12) respectivamente, tomando como factor de fricción $f = 0.18$ y para la turbulencia 1.1. El porcentaje de disipación de energía en la simulación numérica FLOW 3D se determina, de igual forma, con la ecuación (13) disponiendo los valores de carga hidráulica total al inicio y pie de la rápida.

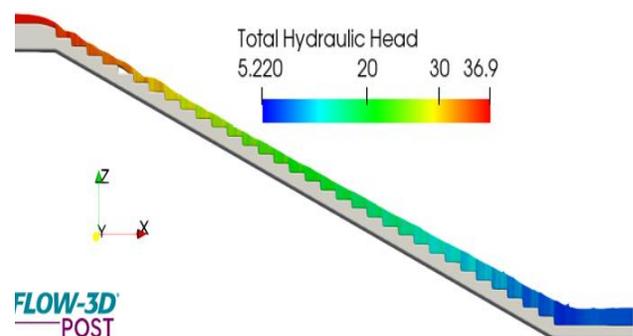


Figura 15. Carga Hidráulica Total FLOW-3D. Puengasí – Itchimbí.

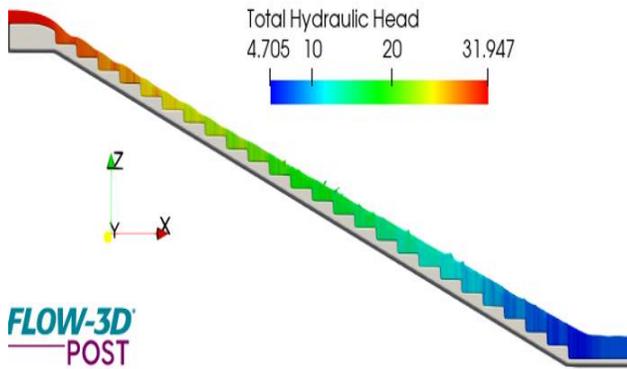


Figura 16. Carga Hidráulica Total FLOW-3D. Calderón – Calderón.

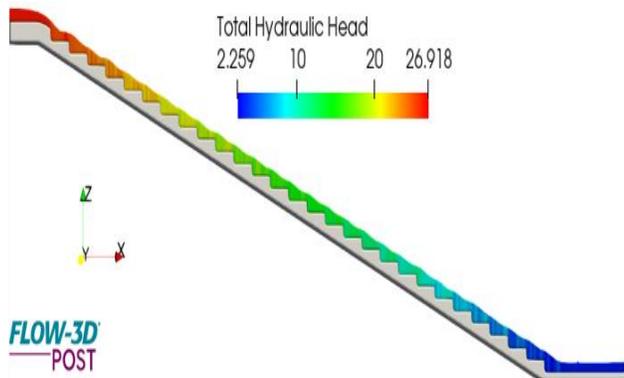


Figura 17. Carga Hidráulica Total FLOW-3D. Tanque Solanda – La Argelia.

Representa el valor más importante de la investigación, se puede considerar que el porcentaje de disipación de energía en las tres rápidas escalonadas propuestas es bastante aceptable. Tanto en el cálculo teórico, como en la simulación CFD oscila entre el 80% y 90%, siendo los valores teórico-numérico muy similares, a excepción de la rápida Tanque Solanda, donde en el programa Flow 3D supera el 90%, debido a que, como se menciona previamente, no se desarrolla totalmente el flujo y la concentración de agua y aire llega solo al 30%.

Para una mejor evaluación de los datos obtenidos en el análisis semiempírico vs numérico, se define la tabla 14, en la que se muestran los resultados más representativos de la investigación para los tres modelos de estructuras escalonadas propuestos.

Tabla 14. Resultados teóricos y de la simulación numérica de una rápida escalonada con flujo rasante.

Estación	Calderón - Calderón		Puengasí - Itchimbía		Tanque Solanda - La Argelia	
Pendiente	23		23		21	
Altura H (m)	30		35		25	
Longitud L (m)	70,68		82,45		65,13	
Huella l (m)	2,65		2,30		2,20	
Contrahuella h (m)	1,15		1		0,85	
Ancho b (m)	3		3,5		2,5	
	MATHCAD	FLOW 3D	MATHCAD	FLOW 3D	MATHCAD	FLOW 3D
Caudal Q (m³/s)	12,35	12,33	11,71	11,96	6,827	6,85
Número de Froude	1,93	1,600	1,92	1,90	2,057	2
Energía máxima H_{max} (m)	31,80	31,95	36,57	37,14	26,37	26,92
Energía residual H_{res} (m)	4,77	4,71	4,04	5,59	3,54	2,26
Porcentaje de Disipación de Energía (%)	85,01	85,27	88,95	84,95	86,57	91,61
Calado aguas clara d (m)	0,47	0,71	0,42	1,09	0,36	0,72
Calado mezcla de agua-aire y₉₀ (m)	1,903	2,102	0,68	2,07	0,58	0,73
Velocidad pie de la rápida escalonada (m/s)	8,290	10,57	7,99	10,00	7	5,26

3.6. Discusión

3.6.1. Investigación de Casa Tipán

Casa Tipán desarrolla la simulación numérica, en el programa FLOW 3D, de un prototipo a escala de una rápida escalonada con flujo rasante de la ciudad de Quito, sector El Batán, llevada a cabo en el laboratorio de hidráulica de la Escuela Politécnica Nacional [1]. El estudio, así mismo, se basó en la bibliografía de los autores Chanson 1994 y Boes and Minor 2002.

Si bien, no se puede realizar una comparativa de resultados debido a la considerable variación en caudales, pendientes, dimensiones de estructura y de escalones del estudio de Casa Tipán, en relación al presente estudio, se pretende corroborar una metodología aplicada semejante para generar el modelo numérico y los valores de fricción utilizados.

Como se menciona anteriormente, la bibliografía utilizada es similar (Chanson), pero en diferentes versiones para ambos estudios. Por ende, la metódica para determinar número de Froude, inicio de aireación y disipación de energía son similares, a diferencia de la ecuación de Energía Residual que varía en la bibliografía actual de Chanson.

Por lo tanto, la disipación de energía obtenida por Casa es menor a la calculada en la presente investigación. Esto, debido a las diferentes consideraciones de estudio, pero enfatizando el valor de fricción utilizado por el autor Casa, el cual se determinó de manera experimental de $f = 0.12$. A diferencia del valor empírico utilizado en el vigente estudio basados en la investigación experimental de Chanson, con valor de $f = 0.18$ y $K = 6$ otorgados por la Figura 6.

Para entender de mejor manera lo descrito previamente, se introduce en la siguiente ecuación, la fórmula de energía residual que utiliza Casa para su estudio, y se la compara con la utilizada en el presente:

$$\frac{H_{res}}{H_{max}} = \frac{0.54 \left(\frac{d_c}{h}\right)^{0.275} + 1.715 \left(\frac{d_c}{h}\right)^{-0.55}}{\frac{3}{2} + \frac{H_{dm}}{d_c}} \quad (22)$$

$$\frac{H_{res}}{H_{max}} = \frac{\left(\frac{f}{8 \times \sin \theta}\right)^{1/3} + \frac{\alpha}{2} \times \left(\frac{f}{8 \times \sin \theta}\right)^{-2/3}}{\frac{3}{2} + \frac{H_{dm}}{d_c}} \quad (12)$$

A través de la comparación de ecuaciones, se podría hipotetizar que la consideración del factor de fricción en el cálculo de la energía residual puede ser fundamental para una mayor disipación de energía en un modelo propuesto. La ecuación (12) utilizada en este estudio está principalmente ligada a la fricción y la disposición de los escalones, por lo tanto, la respuesta de la misma se ve reflejada en los datos muy semejantes obtenidos teórica y numéricamente.

Si bien el estudio de Casa con respecto al desarrollado en el presente difiere en sus consideraciones, ambas investigaciones desarrollan así, una herramienta muy útil para el prediseño y el análisis numérico de una estructura escalonada.

3.6.2 Alturas óptimas para un Flujo Rasante según la EMAAP-Q

La Empresa Metropolitana de Alcantarillado y Agua Potable de Quito, a través de su norma de diseño de sistemas de alcantarillado, ha desarrollado un capítulo sobre el diseño de disipadores de energía, entre ellos, las rápidas escalonadas con flujo rasante basados en la bibliografía de Chanson, así como en el presente estudio.

La norma menciona lo siguiente: [17]

Uno de los más importantes objetivos a ser alcanzados con el fondo escalonado consiste en lograr una eficiente disipación de energía. En este sentido es de mucha relevancia la selección de la altura del escalón. En la siguiente tabla 5.3.22.4, se presentan las alturas óptimas en función del caudal unitario, como referencia para el diseño.

TABLA N ^o . 5.3.22.4		
q (/s)	Y _c (m)	h opt. (m)
1	0.47	0.14
2	0.74	0.22
5	1.37	0.41
7	1.71	0.51
10	2.17	0.65
12	2.45	0.73

Figura 18. Alturas óptimas para un flujo rasante. EMAAP-Q. [17]

Por su parte, en la investigación desarrollada se obtuvieron los siguientes valores de contrahuella para los caudales unitarios de cada área definida y para los siguientes valores de calado crítico:

Tabla 13. Datos de Caudal unitario, Calado crítico y Altura de Escalón del presente estudio.

q (m ² /s)	Y _c (m)	h (m)
2,740	0,91	0,85
3,42	1,06	1
4,110	1,20	1,15

Si realizamos una comparativa, existe una gran variación en la contrahuella de los escalones para los caudales unitarios desarrollados en la normativa de la EMMAP-Q, con respecto a los determinados en la investigación.

Tomando en cuenta que en nuestro estudio se desarrolla óptimamente el flujo rasante, solo en dos de las tres propuestas de rápidas escalonadas, se podría sugerir una revisión y evaluación más profunda de la bibliografía de Chanson aplicada en la hoja de cálculo y de los datos semiempíricos obtenidos, de forma que nuestra herramienta pueda ser corregida y aplicable para la ciudad de Quito.

A su vez, no se podría comparar totalmente ambos estudios, debido a que no se mencionan en la normativa de la EMMAP-Q datos fundamentales para el prediseño de una rápida escalonada tales como: pendiente del terreno, caudal de diseño, ancho de la rápida, huella y contrahuella para acoplarse al terreno. En nuestro estudio, las dimensiones de los escalones para cada rápida están totalmente ligados a la pendiente del terreno y a una comprobación dada por la ecuación

(4), mientras que para el estudio desarrollado por la entidad metropolitana se desconoce en función de qué valores se obtuvieron las alturas óptimas para el desarrollo del flujo rasante.

4. Conclusiones

Según los resultados obtenidos en el estudio, se concluye que la disipación de energía teórica vs numérica es bastante similar cuando el flujo rasante se desarrolla eficientemente y se alcanza una aireación óptima al 90% de concentración de aire al pie de la rápida. Como se evidencia en el estudio, en las Rápidas Escalonadas de Puengasí y Calderón, se obtienen porcentajes de disipación de energía teórico-numérico bastante congruentes, que oscilan entre 85% y 88% respectivamente. Mientras que, para la Rápida Escalonada de Tanque Solanda, se evidencia una diferencia considerable en el porcentaje de disipación de energía teórico-numérico, por lo que se deduce, no se cumple con el objetivo establecido para ese caso en concreto.

Se comprueba experimentalmente que el porcentaje de concentración de aire al 90%, que se cumple en todos los casos para el prediseño semiempírico, no siempre cumple en la simulación numérica. Por ende, se concluye que existen ciertas limitaciones a corregir, con respecto a la aireación de flujo, en el algoritmo desarrollado para el prediseño de rápidas escalonadas, que presenten caudales de diseño reducidos para condiciones de terreno similares a la de estudio.

Se confirma, en base a la investigación desarrollada, que las estructuras de tipo escalonada (Rápidas escalonadas) con flujo rasante, son muy eficientes a la hora de disipar energía, esto debido a que son capaces de receptor caudales de gran magnitud y, mediante su disposición, realizar un proceso óptimo de recirculación de flujo en cada uno de sus escalones, lo que provoca, la mezcla agua-aire requerida en el flujo para que la disipación de energía se desarrolle de modo adecuado a través de toda la estructura.

Mediante el estudio, se concluye que el Software Flow 3D, utilizado para la simulación numérica de las rápidas propuestas, es una

excelente herramienta complementaria para el análisis del rendimiento y la utilidad de una estructura de carácter hidráulico, así como para la visualización y la representación gráfica de varios fenómenos de flujo, mencionados en la presente investigación, que son muy difíciles de evaluar teóricamente.

Después de realizar el prediseño semiempírico basado en la bibliografía de Chanson y la simulación numérica mediante el programa FLOW 3D, de tres propuestas de rápidas escalonadas para las zonas su, centro y norte de Quito, se concluye que si es factible utilizar este estudio como una herramienta aplicable para el prediseño de estructuras escalonadas de colección y conducción, siempre que se compruebe de manera numérica que se desarrolle totalmente un flujo rasante en la estructura y se pueda corroborar un proceso de aireación de flujo teórico-numérico óptimo para la disipación de energía en la estructura sea óptima.

Mediante la discusión de resultados, se deduce que las alturas óptimas de escalones propuestas por norma de alcantarillado del EMAAP, para la formación de flujo rasante en rápidas escalonadas, no son recomendables en todos los casos, esto debido a la carencia de datos fundamentales para el diseño de una rápida tales como pendiente, huella del escalón. Para determinar las dimensiones de una rápida escalonada es necesario disponer los datos previamente mencionados y ajustar las dimensiones de la estructura a las condiciones de flujo y a las condiciones de terreno in situ.

Referencias

- [1] C. T. E. Patricio, Medelación Numérica del Flujo Rasante en una Rápida Escalonas Aplicando la Dinámica del Fluidos Computacional (CFD). Programa FLOW-3D, Quito: Escuela Politecnica Nacional, 2016.
- [2] International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, Energy Dissipation in Hydraulic Structures, H. Chanson, Ed., Brisbane, 2015.
- [3] R. M. Khatsuria, "Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators", vol. 9, M. Meyer, Ed., Atlanta, Georgia: Marcel Dekker, 2005.
- [4] F. SCIENCE, FLOW-3D@Version 12.0 Users Manual, SANTA FE, NM: www.flow3d.com, 2018.
- [5] F. Science, FLOW-3D@Version 12.0[Computer software], Santa Fe: www.flow3d.com, 2019.
- [6] F. G. Briere, Distribución de Agua Potable y Colecta de Desagües y de Agua de Lluvia, A. Laprise, Ed., Quebec: Presse Internationales Polytechnique, 2005, pp. 169-173.
- [7] L. Mediero Orduña, Hidrología, Madrid: Paraninfo, 2021, pp. 151-155.
- [8] INAMHI, "Determinación de Ecuaciones para el Cálculo de Intensidades Máximas de Precipitación", Quito: INAMHI, 2019.
- [9] G. F. Morasutti Fabris, Diseño de Estructuras de Corrección de Torrentes y Retención de Sedimentos, Bogotá: Ediciones de la U, 2020, pp. 122-123.
- [10] Instituto Nacional de Vías, Manual de Drenaje para Carreteras, J. H. Flórez Gálvez y A. Bolaños Mora, Edits., Bogotá, 2009.
- [11] V. Te Chow, Hidráulica de Canales Abiertos, Santa Fe de Bogotá, Bogotá: MC GRAW HILL INTERAMERICANA, 2005.
- [12] E. Naudascher, Hidráulica de Canales, México DF: LIMUSA, 2016.
- [13] J. Matos, Hydraulic Design of Stepped Spillways over RCC Dams, Zurich:

Proceedings International Workshop on
Hydraulics of Stepped Spillways, 2000.

- [14] United States Department of the Interior,
Design of Small Dams, Tercera Edición ed.,
Washington DC, 1987.
- [15] O. J. Fernández, Técnicas numéricas en
ingeniería de fluidos, Barcelona: REVERTÉ,
S. A., 2012.
- [16] H. K. Versteeg y W. Malalasekera, "An
Introduction to Computational Fluid
Dynamics", vol. 2, London: Pearson
Education, 2007, p. 15.
- [17] E. M. D. A. Y. A. P. EMAAP, NORMAS
DE DISEÑO DE SISTEMAS DE
ALCANTARILLADO PARA LA EMAAP-
Q, Quito: EMAAP, EMPRESA
METROPOLITANA DE
ALCANTARILLADO Y AGUA
POTABLE, 2009.

