

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL**

**GENERACIÓN DE HERRAMIENTAS COMPUTACIONAL (MACROS)  
PARA AUTOMATIZAR EL DISEÑO DE ESCALERAS DE PECES  
TIPO ARTESA**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**EVELYN CRISTINA BURBANO PONLUISA**  
**evelyn.burbano@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: ING. MSc. CRISTINA ALEXANDRA TORRES JACOBOWITZ**  
**cristina.torresj@epn.edu.ec**

**QUITO, agosto 2022**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Burbano Ponluisa Evelyn Cristina declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

**EVELYN CRISTINA BURBANO PONLUISA**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Evelyn Cristina Burbano Ponluisa, bajo mi supervisión.

---

**Ing. Cristina Torres J. M.Sc.**  
**DIRECTOR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Evelyn Cristina Burbano Ponluisa

Ing. Cristina Torres J. M.Sc.

## **DEDICATORIA**

De corazón, dedico este documento a mi familia que siempre ha estado presente, aconsejándome y apoyándome a seguir adelante y cumplir mis metas.

## **AGRADECIMIENTO**

A mi madre Eugenia Ponluisa, una mujer que ha luchado todos los días por darme lo necesario para llevar una vida cómoda, a ella que siempre ha estado presente en mis logros y fracasos, apoyándome e impulsándome a seguir mis objetivos, gracias por ser un pilar fundamental en mi vida. Te amo madre.

A mis hermanos Jessica, Neisser y Leticia que siempre me han brindado su apoyo incondicional, alentándome a seguir adelante para cumplir con mis sueños.

A mi amiga Dayana quien ha estado presente en gran parte de mi vida educativa, gracias a su amistad, la vida universitaria fue una experiencia increíble.

Expreso mi agradecimiento a los docentes de la Escuela Politécnica Nacional que han sabido impartir su conocimiento para contribuir en mi formación profesional.

De manera especial a la Ing. Cristina Torres, quien con sus conocimientos y paciencia me guio para culminar este proyecto de titulación.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	V
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT .....	XII
<b>1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo general .....	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Marco teórico.....	3
1.4.1. Caudal ecológico. ....	3
1.4.2. Escalera de peces: .....	4
1.4.2.1. Efectividad en el diseño de escalera de peces.....	5
1.4.2.2. Criterios para seleccionar el tipo de escalera.....	6
1.4.3. Tipos de escaleras de peces. ....	6
1.4.3.1. Rio artificial .....	6
1.4.3.2. Ascensores de peces.....	7
1.4.3.3. Escalera de ralentizadores o escalera Denil.....	8
1.4.3.4. Esclusa de peces o esclusa Borland.....	9
1.4.3.5. Escalera de ranura vertical.....	11
1.4.3.6. Escalera de estanques sucesivos o escalera de artesa .....	11
1.4.3.6.1. Tipo de geometría en la escalera de peces de artesa .....	12
1.4.3.6.2. Proceso de funcionamiento:.....	15
1.4.4. Características para estimar la efectividad de la escalera de peces. ....	16

1.4.5.	Ubicación de la escalera de peces .....	17
1.4.6.	Peces que circulan en los ríos ecuatorianos.....	18
1.4.6.1.	Capacidad de nado y salto:.....	18
1.4.6.2.	Natación y resistencia:.....	18
1.4.7.	Factores influyentes en el diseño:.....	20
1.4.8.	Parámetros fundamentales de principios ecológicos. ....	21
1.4.9.	Característica de diseño:.....	23
1.4.9.1.	Caudal .....	23
1.4.9.2.	Desnivel de cotas o altura total (htotal) .....	29
1.4.9.3.	Número de estanques (N) .....	29
1.4.9.4.	Salto mínimos: .....	30
1.4.9.5.	Dimensionamiento del orificio rectangular .....	30
1.4.9.6.	Dimensionamiento del vertedero.....	32
1.4.9.7.	Dimensionamiento del estanque .....	35
1.4.9.8.	Dimensionamiento de la escalera: .....	37
1.4.9.9.	Dimensiones de la piscina de entrada y salida.....	39
<b>2</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>41</b>
2.1.	Introducción.....	41
2.1.1.	Revisión de la información.....	41
2.1.2.	Análisis de información.....	41
2.1.3.	Lenguaje de programación .....	41
2.2.	Diseño de la herramienta computacional en macros de Excel .....	42
2.2.1.	Diagrama de flujo .....	42
2.2.2.	Pasos para la creación de la escalera de peces:.....	45
2.2.3.	Creación de la interfaz.....	45
2.2.4.	Proceso de codificación para el diseño de la herramienta: .....	47
<b>3</b>	<b>RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>57</b>
3.1.	Ejemplo práctico .....	57
3.1.1.	Datos de la especie: .....	57

3.1.2.	Datos de diseño.....	58
3.1.3.	Datos resultantes:.....	60
3.1.3.1.	Dimensión del estanque:.....	60
3.1.3.2.	Dimensión de la escalera de peces:.....	60
3.1.2.	Dimensión de la piscina de entrada y salida .....	61
3.1.3.	Orificio .....	61
3.1.4.	Vertedero:.....	62
3.1.5.	Orificio y Vertedero .....	63
3.1.6.	Resultados escalera de peces tipo artesa con orificio: .....	64
3.1.7.	Resultados escalera de peces tipo artesa con vertedero: .....	65
3.1.8.	Resultados escalera de peces tipo artesa con vertedero y orificio:.....	66
3.2.	Manual de uso:.....	67
3.2.1.	Selección del tipo de escalera: .....	67
3.2.2.	Orificio .....	70
3.2.3.	Vertedero:.....	70
3.2.4.	Mixto.....	71
3.3.	Video tutorial para el manejo de la herramienta computacional. ....	72
3.4.	Herramienta computacional para la escalera de peces tipo artesa .....	72
3.5.	Conclusiones .....	72
3.6.	Recomendaciones .....	74
<b>4</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>75</b>
<b>5</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>76</b>
5.1.	Anexo I: Ejemplo de cálculo con Ecuaciones.....	76



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Escalera de peces John Day Lock and Dam.....	5
Figura N° 2: Río artificial.....	7
Figura N° 3: Ascensor de peces 0.1.....	8
Figura N° 4: Escalera ralentizadora o Denil.....	9
Figura N° 5: Esclusa de peces o Borland.....	10
Figura N° 6: Escalera de ranura vertical.....	11
Figura N° 7: Escalera tipo artesa.....	12
Figura N° 8: Tipos de geometrías.....	12
Figura N° 9: Tabiques y escotaduras libres.....	13
Figura N° 10: Escalera de peces tipo artesa.....	14
Figura N° 11: Funcionamiento de escalera de peces tipo artesa.....	15
Figura N° 12: Movimiento del flujo en la escalera de peces tipo artesa.....	16
Figura N° 13: Ubicación correcta, pero con problemas de acceso.....	17
Figura N° 14: Ubicación correcta.....	17
Figura N° 15: Ubicaciones desfavorables para el acceso de peces.....	17
Figura N° 16: Velocidad de nado y tiempo de permanencia.....	19
Figura N° 17: Tiempo de permanencia según la longitud del pez y temperatura.....	19
Figura N° 18: Información corporal de los peces.....	22
Figura N° 19: geometría y partes de la escalera.....	23
Figura N° 20: Caudal a través de un orificio.....	24
Figura N° 21: Caudal a través de un vertedero- sumergido.....	25
Figura N° 22: Caudal a través de un vertedero- superficie libre.....	26
Figura N° 23: Caudal a través de un orificio y vertedero.....	27
Figura N° 24: Partes de un orificio rectangular.....	30
Figura N° 25: Partes de un vertedero rectangular.....	32
Figura N° 26: Partes del estanque.....	35

Figura N° 27: Partes de la escalera de peces .....	38
Figura N° 28: Partes de la Piscina .....	40
Figura N° 29: Portada de la herramienta computacional .....	46
Figura N° 30: Portada de los tipos de escaleras diseñadas .....	46
Figura N° 31: Interfaz de la escalera de peces con orificio.....	47
Figura N° 32 : Datos iniciales de la especie con sus respectivos ábacos.....	48
Figura N° 33: Casillas para introducir datos de cotas y caudal.....	48
Figura N° 34: Casillas para introducir el espesor del dique .....	48
Figura N° 35: Casilla del ancho del estanque y el coeficiente de descarga.....	49
Figura N° 36: Casillas para introducir valores del salto de agua y energía de disipación. 49	
Figura N° 37: Casillas para introducir los datos necesarios para el dimensionamiento de la piscina de acceso. ....	50
Figura N° 38: Imágenes con dimensiones de la escalera de peces .....	50
Figura N° 39: Casillas del caudal de diseño y la diferencia de cotas de entra y salida.....	51
Figura N° 40: Calado mínimo del estanque.....	51
Figura N° 41: Longitud total del estanque .....	52
Figura N° 42: Numero de estanques a lo largo de la escalera de peces .....	52
Figura N° 43: Longitud total de la escalera de peces tipo artesa.....	52
Figura N° 44: Velocidad inicial con la que ingresa el caudal a la escalera de peces .....	52
Figura N° 45: Pendiente de la escalera de peces .....	53
Figura N° 46: Longitud recorrida del pez.....	53
Figura N° 47: Dimensionamiento de la piscina de peces .....	53
Figura N° 48: Dimensionamiento del orificio rectangular.....	54
Figura N° 49 Dimensionamiento de la escalera de peces con vertedero. ....	55
Figura N° 50: Dimensionamiento de la escalera de peces con vertedero. ....	56
Figura N° 51: Datos de la especie y sus respectivos ábacos .....	57
Figura N° 52: Ejemplo para encontrar el $T_p$ y $V_n$ .....	58
Figura N° 53: Datos de diseño .....	58
Figura N° 54: Tabla para dimensionamiento del estanque.....	59

Figura N° 58: Resultados para el dimensionamiento del orificio.....	61
Figura N° 59: Tabla para conocer el salto de agua según la especie.....	62
Figura N° 60: Resultados para el dimensionamiento del vertedero.....	62
Figura N° 62: Resultados del ejemplo práctico para dimensionamiento de la escalera de peces tipo artesa con orificio rectangular.....	64
Figura N° 63: Resultados del ejemplo práctico para dimensionamiento de la escalera de peces tipo artesa con vertedero rectangular. ....	65
Figura N° 64: Resultados del ejemplo práctico para dimensionamiento de la escalera de peces tipo artesa con orificio rectangular. ....	66
Figura N° 65: Imagen de la portada y tipos de estructuras.....	67
Figura N° 66: Formato de la escalera de peces tipo artesa.....	68
Figura N° 67: Ubicación y uso de los ábacos.....	68
Figura N° 68: Ubicación de la tabla para dimensionamiento del estanque.....	69
Figura N° 69: Ubicación de valores para el dimensionamiento de la piscina.....	69
Figura N° 70: Ubicación de valores para el dimensionamiento del orificio.....	70
Figura N° 71: Ubicación de tabla de vertedero y resultado para vertedero.....	71
Figura N° 72: Resultado de caudales y dimensionamiento para estructura mixta. ....	71

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: velocidades de natación de la Trucha y Salmon en función a la temperatura 18	
Tabla N° 2: Valores recomendados para el diseño de la escalera de peces tipo artesa con vertedero. ....	32
Tabla N° 3 Dimensiones del estanque según el tamaño de pez. ....	37

## RESUMEN

Las construcciones hidráulicas, obstruyen el ciclo de vida de los seres acuáticos, alterando su hábitat y generando modificaciones abióticas en el agua, por ello se diseñan las escaleras de peces, con el fin de garantizar el caudal ecológico y contribuir en la conservación de las especies.

La información es obtenida de distintas fuentes bibliográficas de investigación, en la tesis de "Diseño y optimización de herramientas (macros) para el dimensionamiento de escalera de peces" realizada por Edwin Barrera y Daysi Sanunga [1]. Se elaboro una herramienta computacional que ayuda al dimensionamiento de las escaleras de peces con estanques sucesivos y escalera de peces con hendidura vertical. En este documento se continua con la elaboración de herramientas computacionales para la escalera de peces tipo artesa, de igual manera se realizo en macros de Excel.

Para cada modelo de escalera para peces, se tiene diferentes parámetros de diseño, recomendaciones de uso, ubicación y criterios de diseño que facilitan el dimensionamiento de la escalera de peces. Con esta información se debe elegir la escalera de peces que mejor se apege a las características de diseño, se considera la adaptación que tiene la ictiofauna en cada una de las estructuras, donde interviene las velocidades, pendientes y caudales. La escalera tipo artesa se subdivide en varios modelos; con orificio, vertedero y mixta. Se elije este tipo de escalera de peces para caudales de 0.25 a 0.7 m<sup>3</sup>/s, con pendientes máximas de 10% y para velocidades de ingreso no mayores a 2 m/s. Además, se tiene ábacos de las capacidades morfológicas de los peces que transitan en este tipo de escalera

La escalera de peces tipo artesa posee piscinas de entrada y salida, estanques de descanso para los peces, diques, paredes divisorias que forman los estanques y estructuras como el vertedero y orificio.

Se generó una herramienta computacional en macros de Excel, cuya función es facilitar el dimensionamiento de escalera de peces tipo artesa, además para conocer el manejo de la herramienta se elaboró un manual de uso y un video didáctico para facilitar y familiarizar al usuario con el uso de esta.

**PALABRAS CLAVE:** Caudal ecológico, Escalera de peces, Estanques sucesivos, Orificio, Vertedero, Artesa.

## ABSTRACT

Hydraulic constructions obstruct the life cycle of aquatic beings, altering their habitat and generating abiotic modifications in the water; therefore, fish ladders are designed in order to guarantee the ecological flow and contribute to the conservation of the species.

The information is obtained from different bibliographic research sources, in the thesis "Design and optimization of tools (macros) for fish ladder sizing" by Edwin Barrera and Daysi Sanunga [1]. A computational tool was developed to help in the sizing of fish ladders with successive pools and fish ladders with vertical slit. In this paper we continue with the development of computational tools for the trough type fish ladder, as well as in Excel macros.

For each fish ladder model, there are different design parameters, recommendations for use, location and design criteria that facilitate the sizing of the fish ladder. With this information, the fish ladder that best suits the design characteristics should be chosen, considering the adaptation of the ichthyofauna in each of the structures, where velocities, slopes and flow rates intervene. The trough type ladder is subdivided into several models: with orifice, spillway and mixed. This type of fish ladder is chosen for flow rates of 0.25 to 0.7 m<sup>3</sup>/s, with maximum slopes of 10% and for inlet velocities not exceeding 2 m/s. In addition, there are abacuses of the morphological capacities of fish passing through this type of ladder.

The trough type fish ladder has inlet and outlet pools, fish resting ponds, dikes, dividing walls that form the ponds and structures such as the weir and orifice.

A computational tool was generated in Excel macros, whose function is to facilitate the dimensioning of trough type fish ladder, also to know how to use the tool, a user manual and a didactic video were elaborated to facilitate and familiarize the user with the use of this tool.

**KEYWORDS:** Ecological flow, fish ladder, successive ponds, orifice, weir, Artesa.

# 1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Las construcciones de obras hidráulicas se han desarrollado al paso del tiempo, pero no se consideró las consecuencias que pueden producirse en el ecosistema, ciertas obras obstruyen el paso del caudal de los ríos, afectando la vida de la ictiofauna. Para mitigar los daños ocasionados por vertederos, azudes, presas hidroeléctricas, diques, etc., se recomienda la construcción de escaleras como mecanismos del cuidado del ecosistema, por ellos, en los diseños hidráulicos se presentan alternativas para mantener el equilibrio del caudal ecológico. Las consecuencias de no tener este tipo de estructuras son alarmantes, ya que no solo se pierden los ecosistemas acuáticos, también se pierden propiedades del agua afectando la calidad de esta.

Una escalera de peces debe transportar el caudal ecológico desde un punto a otro, es decir desde aguas arriba de la obstrucción hasta aguas debajo de la misma. La escalera de peces debe ser diseñada para que su funcionamiento sea efectivo y no se necesite de la intervención humana.

Uno de los requerimientos importantes para la efectividad del funcionamiento de la escalera de peces, es conocer la ubicación más favorable, es decir, que facilite la entrada y salida de los peces, además debe cumplir con los criterios recomendados para que no existan aglomeraciones en la entrada. Otro factor importante es evitar un flujo turbulento, ya que esto afecta a las capacidades natatorias del pez y además puede ocasionar lesiones físicas en la especie.

Las estructuras de paso son diversas, para elegir la escalera de peces efectiva, se consideran varios parámetros como la topográfica del terreno, especies que transitan en el río, el caudal de diseño, pendientes del terreno entre otras características que se mencionaran en el documento.

Para facilitar el diseño de la escalera de peces se desarrolla una herramienta computacional que facilita el dimensionamiento de la esclera de peces tipo artesa, con tres modelos diferentes. Cada modelo posee sus ecuaciones y parámetros de diseño correspondiente. La herramienta computacional se realizó en macros de Excel, haciendo uso del lenguaje de programación Visual Basic for Application.

## **1.1 Objetivo general**

Crear una herramienta computacional en MACROS de Excel, con base en los datos hidrológicos e hidráulicos, para el dimensionamiento de una escalera de peces tipo artesa, respetando las normas ambientales y de diseño.

## **1.2 Objetivos específicos**

1. Analizar la información sobre el diseño de escalera de peces tipo artesa, tomando en cuenta parámetros hidráulicos, dimensionamiento y geometría.
2. Programar en MACROS de Excel una herramienta computacional que ayude a optimizar el diseño de la escalera de peces tipo artesa.
3. Comprobar el funcionamiento de la herramienta computacional creada en Excel, utilizando un ejemplo práctico
4. Genera un manual de uso de la herramienta, con el fin de mostrar al usuario los pasos a seguir para su funcionamiento.

## **1.3 Alcance**

Con base en la información teórica de escaleras de peces tipo artesa, se creó una herramienta computacional que ayuda al dimensionamiento de la estructura hidráulica, respetando los parámetros hidráulicos, geométricos y ambientales.

Para ello se desarrolló una herramienta computacional en macros de Excel, en la cual se hizo uso de las ecuaciones teóricas, donde se tomó en cuenta los diferentes factores que permiten el diseño de la estructura. La herramienta computacional facilita el diseño de la escalera de peces tipo artesa, respetando las normas ambientales y de construcción, tomando en cuenta la ubicación óptima, condiciones de entrada y salida de la escalera, longitudes, pendientes, tiempos de permanencia y bases del diseño, es decir considerando todas las características hidráulicas e hidrológicas para el diseño.

El análisis de resultados se realizó a través de un ejemplo práctico. Finalmente se elaboró un manual para el uso del programa, en donde se indica paso a paso el uso y funcionamiento de este. Además, se realizó un video tutorial mostrando desde el ingreso de datos, ubicación de las tablas y ábacos que se ocuparan para el desarrollo del diseño, hasta los resultados que se obtienen en la herramienta.

## 1.4 Marco teórico

### 1.4.1. Caudal ecológico.

El caudal ecológico es una expresión que define al caudal necesario para conservar y restaurar el funcionamiento ecológico y servicios ambientales del sistema natural, como la calidad del agua, protección y conservación de vida acuática [2]. El caudal ecológico ayuda a la estimación del caudal mínimo requerido que debe circular en la zona establecida según los criterios de la gestión ambiental, permitiendo el retorno natural de la vida acuática y sus ecosistemas. [3].

La ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamientos del agua, establece en el Artículo 76;

*“Caudal ecológico. Para los efectos de esta Ley, caudal ecológico es la cantidad de agua, expresada en términos de magnitud, duración, época y frecuencia del caudal específico y la calidad de agua expresada en términos de rango, frecuencia y duración de la concentración de parámetros que se requiere para mantener un nivel adecuado de salud en el ecosistema”.* [4]

El artículo 411 de la constitución señala la importancia de los caudales ecológicos de la siguiente manera:

*“El estado garantiza su conservación, recuperación, y, manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y de los caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico”* [4].

Por ello es importante que, al construir una obra hidráulica, se respete la vida de las especies del área, planteando soluciones como vías de tránsito como escalera de peces, para afectar lo menos posible su ciclo de vida. [4]

Para estimar el caudal ecológico en Ecuador, se hace uso de un porcentaje del caudal natural del río, donde el caudal ecológico será igual a:

- El 10% del caudal mínimo promedio anual es igual al caudal ecológico.
- El 50% al 95% del caudal mínimo en época de estiaje.

Por otro lado, el caudal ecológico se puede determinar aplicando diferentes metodologías como hidrología, hidráulica, simulación de hábitat y holística, para ello, se emplean diversos



criterios y condiciones que son parte del caudal del río, como la topográfica de la zona por donde fluye el cauce, biología acuática, hidrología e hidráulica. [3]

#### **1.4.2. Escalera de peces:**

Las escaleras de peces son estructuras hidráulicas que se encuentran ubicadas junto a la estructura del desagüe de fondo. La escalera de peces está diseñada para permitir el tránsito adecuado del caudal ecológico, garantizando la protección, reproducción y conservación de las especies acuáticas que migran en su entorno natural, [5].

Las obstrucciones hidráulicas, ocasionan modificaciones en los factores abióticos del agua, afectando de manera directa la velocidad del flujo, calidad del agua, materia orgánica, gases y sólidos disueltos, pérdidas de niveles del flujo que modifican parámetros de profundidad y ancho, alterando el hábitat de la vida acuática, temperaturas calientes bajando la resistencia de los peces. [6]. Otros efectos negativos que se producen por estas obstrucciones civiles son la pérdida del hábitat, modificación de las vías de migración, desaparición de refugios para protección de depredadores, muerte de las especies debido a la sobresaturación del oxígeno, a incremento de peces aguas abajo de la obstrucción al paso migratorio por turbinas y vertederos, etc. [2] [1]

Las escaleras de peces son estructuras que permiten la conservación de las especies acuáticas, para elegir el tipo de estructura de peces óptima, se debe considerar la capacidad de nado y salto de peces, por ello existen una variedad de estructuras con diferentes geometrías que hacen frente a obras hidráulicas u obstáculos como presas con alturas mayores a 10m, azudes con alturas máximas de 10m, vados, estaciones de aforo, puentes para paso vehicular, etc. [2]

Las obras de retención hidráulica son estructuras muy pequeñas en relación con el canal principal y su ubicación es de gran importancia, generalmente se ubican paralelo a la dirección del flujo. [3] Se construyen en la parte lateral de la represa, enfocándose en las zonas donde se concentran más las especies, con objetivo de mitigar el impacto ambiental ocasionado por las presas hidroeléctricas, manteniendo siempre la conectividad acuática entre dos puntos, es decir aguas arriba y aguas abajo de una obstrucción u obra hidráulica, donde el punto final se conecta con el río o flujo del cauce natural. [7]



**Figura N° 1:** Escalera de peces John Day Lock and Dam.

**Fuente:** Karim Delgado (fotógrafo), Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos <https://www.nwp.usace.army.mil/Media/Images/igphoto/2001894288/>.

#### 1.4.2.1. Efectividad en el diseño de escalera de peces

La escalera de peces se considera efectiva cuando se transporta el 95% de las especies que pasen por la barrera de peces, excepto en estructuras diseñadas con bombas o de alto nivel.

Existen varios criterios que se deben tomar en cuenta para que la escalera de peces tenga un óptimo funcionamiento, debe cumplir lo siguiente. [1]

- El punto de acceso debe ser de fácil ubicación para el ingreso de peces y entrar sin demora para continuar con su movimiento de migración
- El trayecto debe ser fácil de cruzar para no fatigar o estresar a los pece-
- El punto de salida debe desembocar en una zona segura y sin tanta turbulencia.
- El diseño debe considerar las distintas especies que migran en ese cause.
- La estructura debe ser de fácil mantenimiento ya que se pueden estancar sedimentos o basuras en las paredes divisorias de las escaleras de peces.
- Se deben realizar inspecciones periódicas, verificando que no se produzca amontonamiento de las especies acuáticas.
- El diseño debe ser funcional en temporada de estiajes y crecidas.

#### **1.4.2.2. Criterios para seleccionar el tipo de escalera**

Todas las escaleras de peces son eficientes y cumplen con su objetivo principal que es transportar a los peces por una vía segura para que continúen con su migración desde un punto a otro, especialmente cuando se tiene la presencia de obras hidráulicas como presas hidroeléctricas, por ello se toma en cuenta los parámetros de diseño, los más básicos son los siguientes: [8].

- Los ascensores y esclusas se usan generalmente cuando se tiene grandes desniveles de  $H > 8$  m, además son más económicos.
- Las escaleras tipo artesa y ralentizadoras se usan cuando se tienen desniveles más pequeños de  $H < 4$  m.
- La escalera Denil se usa cuando se tiene desniveles pequeños de  $H < 2.5$  m y velocidades en el rango de 100 a 500 l/s.

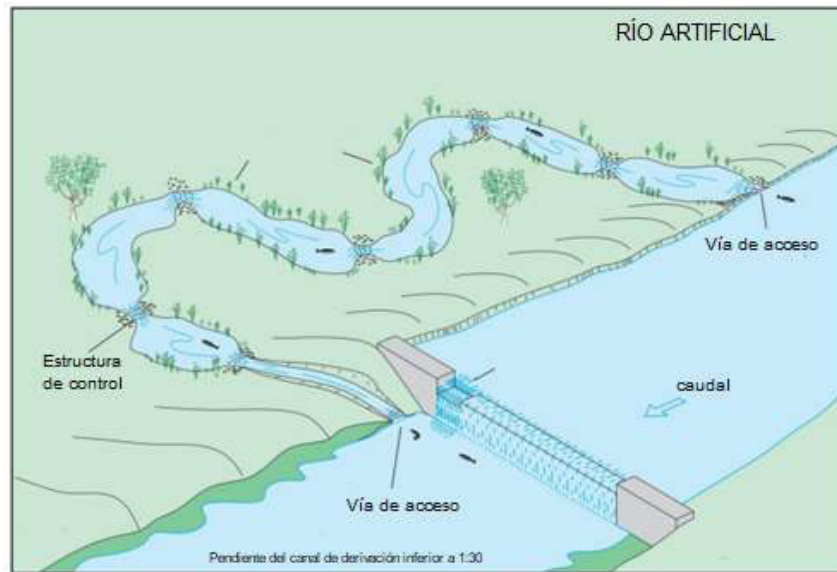
#### **1.4.3. Tipos de escaleras de peces.**

Existen varios tipos de escaleras de peces que actualmente se emplean en las obras hidroeléctricas, cada una se usa dependiendo de ciertas características hidrológicas, hidráulicas, topográficas y biológicas, es decir, considerando el tipo de especie acuática que circule en dicho entorno. En los diseños se considera la efectividad a la conservación de la especie acuática, la eficiencia de su funcionamiento y accesibilidad de los peces a la escalera. [9] Entre las más comunes se tiene las siguientes:

##### **1.4.3.1. Río artificial**

La rampa de piedra o río artificial es el paso de peces más económico y amigable con la naturaleza, ya que el río artificial se integra fácilmente al entorno. Permite el tránsito de las especies, funcionando como ruta de subida y retorno para los peces, este diseño se realiza a través de un canal que se encuentra dividido en pequeños tramos, misma que posee pendientes que varían entre 3 y 5%, garantizando que el nivel de agua sea estable y los peces puedan acceder fácilmente la vía de traslado. [9]

Este diseño de río artificial, solo es aplicable para cruzar obstáculos de 2 hasta 3 metros de altura, al ser mayor, se requiere de una longitud de desarrollo muy grande. Otra característica importante es que, el fondo de este río artificial posee material granular mixto, obteniéndose una superficie rugosa que facilita el traslado de los peces [1], por ello se vuelve una vía de traslado que no requiere tanto mantenimiento. [8].



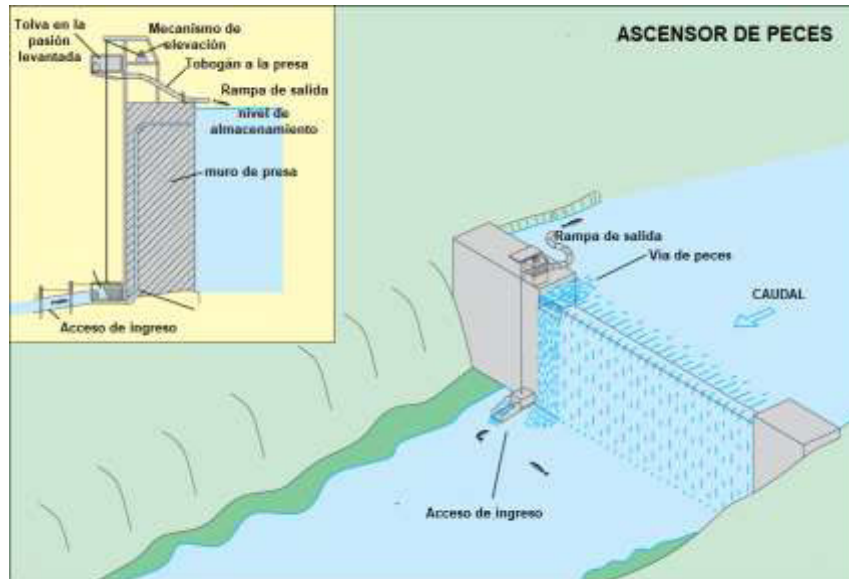
**Figura N° 2:** Río artificial.

**Fuente:** Garry Thorncraft y John H. Harris. "fish passage y fishways" [6]

#### 1.4.3.2. Ascensores de peces

Es una caja tipo ascensor que consta de un sistema mecánico, generalmente se ubica en la zona de mayor concentración de peces, cuya dinámica es subir la caja hasta aguas arriba de la obstrucción y luego vaciar su contenido, permitiendo que las especies continúen su trayecto. [1] [8].

El diseño hidráulico consta de varias cajas o capas que ascienden hasta cualquier altura, por ello es utilizada en obras hidráulicas que poseen obstrucciones desde 6 metros de alto. [8] Generalmente son obras que ocupan poco espacio, pero su costo de construcción es sumamente alto y requiere de un constante mantenimiento. [1]



**Figura N° 3:** Ascensor de peces 0.1.

**Fuente:** [6] Garry Thorncraft y John H. Harris. "fish passage y fishways"

#### 1.4.3.3. Escalera de ralentizadores o escalera Denil

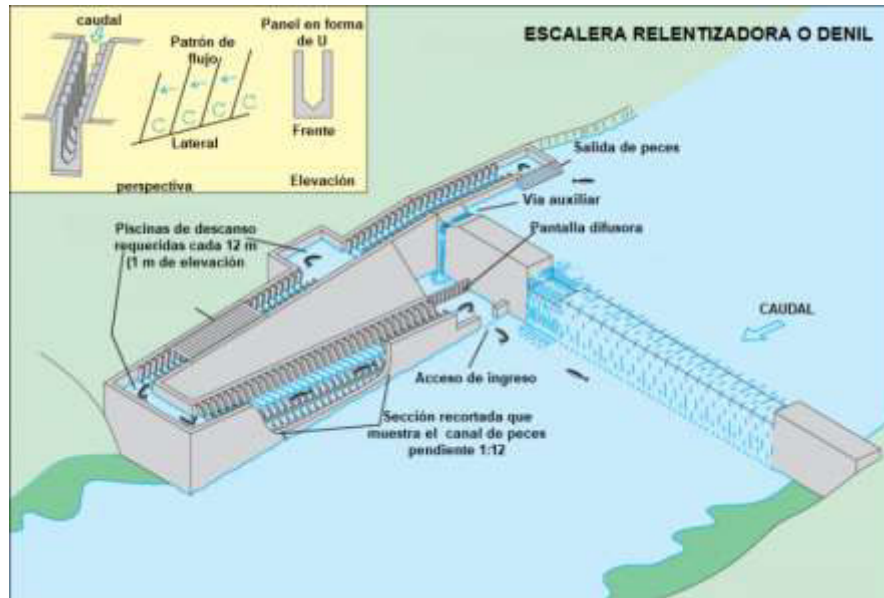
La escalera ralentizadora también conocida como escalera Denil, debido al nombre del inventor, posee un diseño estructural conformado por un canal recto con pendientes relativamente altas que varían entre 10 hasta 20%, en el fondo del canal se ubican deflectores con geometrías peculiares, que ayudan a reducir la velocidad del caudal, para que los peces puedan transitar en la vía de flujo, sin peligro a lesiones o traumas en su morfología. [10]

Existen varios tipos de deflectores para este tipo de escalera, entre los más usados están:

- Deflectores planos
- Deflectores fatuos
- Deflectores de fondo supurativos
- Deflectores de fondo grueso.

En la ingeniería hidráulica, se han realizado varios ensayos, concluyendo que la escalera de peces con deflectores planos, son los más utilizados, debido a su fácil diseño, ya que puede ser ensamblada con piezas elaboradas fuera del punto de ubicación. [9] Una de las

desventajas para su uso es que, al ser aptas para fuentes pendientes, no posee piscinas intermedias y solo son aplicadas en obras con obstáculos de 2 a 4 metros de altura, disminuyendo así su aplicación. [1]



**Figura N° 4:** Escalera ralentizadora o Denil.

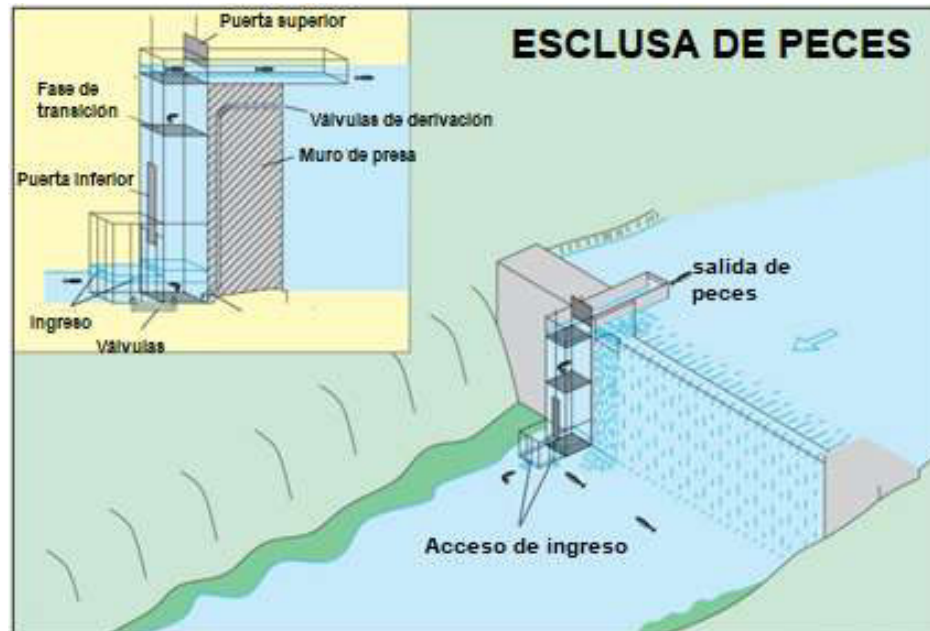
**Fuente:** Garry Thorncraft y John H. Harris. "fish passage y fishways" [9]

#### 1.4.3.4. Esclusa de peces o esclusa Borland

La esclusa Borland o de peces es un dispositivo de paso discontinuo al igual que el ascensor de peces, pero de una sola vía, es decir no sirve para retorno, pero si permite cambios de caudales relativamente grandes. [8] Trabaja a través de dos cámaras, la estabulación y la superior, cada una con su respectiva puerta de acceso que se encuentra conectada a un conducto por donde nada el pez, hasta ascender y vaciarse luego de la obstrucción. [11].

Al ser un conducto, requiere de una gran capacidad de llamado o atracción para que los peces vayan a la esclusa, también requiere de mantenimiento continuo, ya que pueden existir obstáculos que obstruyan el paso de los peces. [1] [8].

El dispositivo requiere de velocidades y turbulencia moderadas para que los peces se guarden aguas abajo, ya que, al ingresar grandes cantidades de aire, los peces pueden quedarse en la cámara de la esclusa, aguas abajo y evitar el traslado de las especies. [2]



**Figura N° 5:** Esclusa de peces o Borland

**Fuente:** [6] Garry Thorncraft y John H. Harris. "fish passage y fishways"

### **Funcionamiento de la esclusa de peces o Borland.**

El funcionamiento de este dispositivo se separa en dos procesos, primera trata del funcionamiento de migración de los peces. El segundo proceso de migración va desde aguas abajo hacia aguas arriba. Cada proceso tiene las siguientes etapas. [2]

1. Etapa de atracción: es el primer paso para traslado de los peces, esta etapa ocurre cuando los peces se concentran en el punto de acceso o ingreso.
2. Etapa de llenado: se da cuando los peces se encuentran en la esclusa y se dirigen aguas arriba de la obstrucción.
3. Etapa de salida: es la etapa semifinal, donde los peces se trasladan a la salida de la esclusa para finalmente llegar a la etapa de vaciado
4. Etapa de vaciado: es la etapa final, donde los peces se dirigen al flujo ecológico, tomando el curso de la causal natural al que pertenecen.

#### 1.4.3.5. Escalera de ranura vertical

La escalera de ranura vertical es muy utilizada en América del norte, tiene características similares a la escalera de peces tipo artesa, con la diferencia de tener hendiduras al mismo lado y no intercalado. [1].

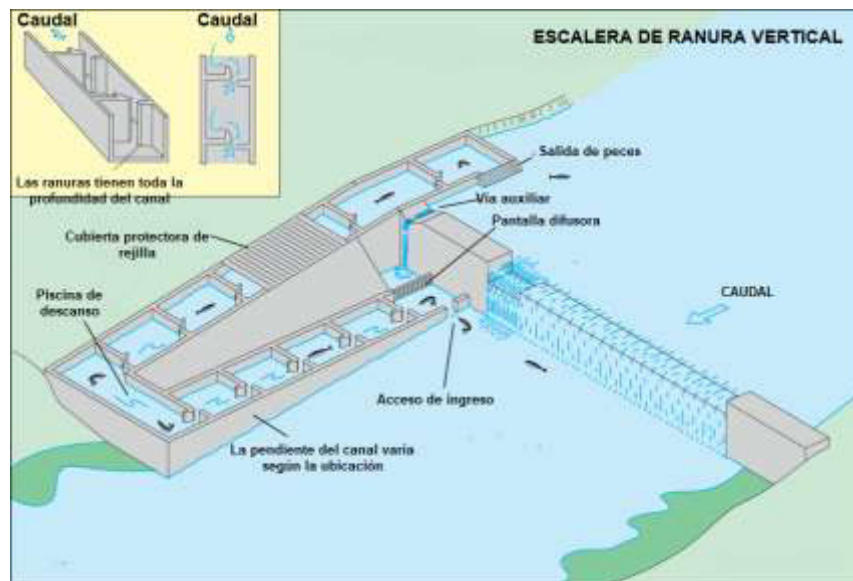


Figura N° 6: Escalera de ranura vertical.

Fuente: [6] Garry Thorncraft y John H. Harris. "fish passage y fishways"

#### 1.4.3.6. Escalera de estanques sucesivos o escalera de artesa

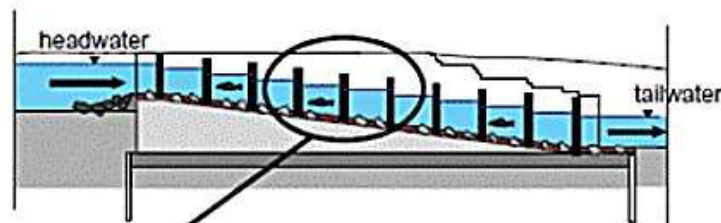
La esclera de estanques sucesivas posee un canal que va desde el área de almacenamiento de agua, es decir aguas arriba de la obstrucción hasta la zona de desembocadura donde los peces requieren ser trasladados, llegando al cauce natural del flujo. [3]

Este tipo de vía posee una serie de escalones o paredes que forman estanques que sirven como una zona de descanso para los peces y también garantiza la disipación de energía del agua que transita por el canal. Los tabiques son elementos perpendiculares que van desde aguas arriba del obstáculo, hasta aguas abajo del mismo, dirigiendo y controlando el nivel del flujo a través de las paredes provistos de aliviaderos, orificios o hendiduras verticales que se encuentran ubicados de manera alternada en las paredes de los tabiques.



El diseño de la escalera está conformado por una rampa inclinada, donde las pendientes de los estanques en la escalera de peces de artesa varían entre 5 a 10%, los escalones se encuentran conectados con saltos de 20 a 30 centímetros de altura dependiendo de la especie acuática que circule por la estructura, entre otras dimensiones se tiene que el largo de los estanques varía entre 2 y 3 metros, mientras que su ancho va de 1 a 3 metros. [10].

Este tipo de escaleras posee un diseño simple y se adapta faciliten a obras hidráulicas antiguas o futuras, por ello es la estructura más usada, tiene varias posibilidades de uso, ya que admite cambios fuertes de hasta 180° en la dirección de flujo, acoplándose fácilmente a topografías accidentadas, mismas que generan grandes velocidades que van disminuyendo durante el trayecto de cada dique, además es una estructura que no requiere un constante mantenimiento. [2].



**Figura N° 7:** Escalera tipo artesa

**Fuente:** ALNUS 2005, <https://www.alnus2005.com/otros-productos>

#### 1.4.3.6.1. Tipo de geometría en la escalera de peces de artesa

Según el tipo de escalera de artesa, se tiene tres diferentes comportamientos de flujo, el flujo a descarga libre, flujo a descarga sumergida. El flujo depende del tipo de paso, entre estos se tiene:

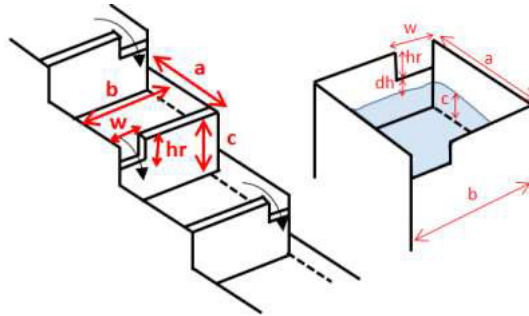


**Figura N° 8:** Tipos de geometrías

**Fuente:** Autoría

## 1. Tabiques y escotaduras libres

El caudal se comunica a través de estanques a flujo con caída libre, pasando sobre los tabiques, generalmente se encuentran ubicados en el centro o en el lado lateral de las paredes de los tabiques, de manera alternada.



**Figura N° 9:** Tabiques y escotaduras libres

**Fuente:** Romero Gil- Diseño de escalera para peces [10].

- *Pasos de estanques sucesivos con tabiques*

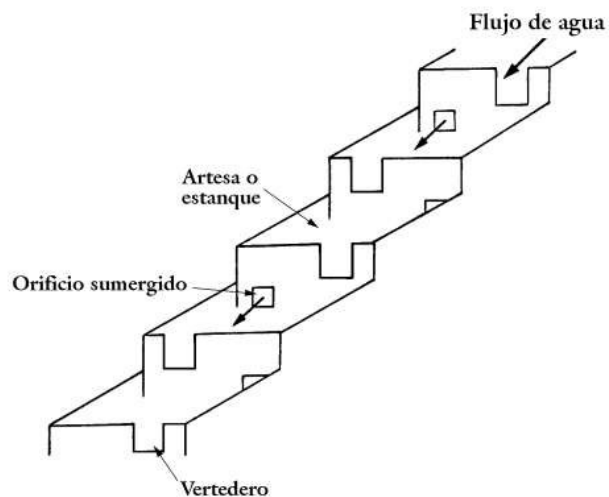
El diseño es sencillo, se ubican tabiques a lo largo del canal, generalmente poseen una inclinación para mejor circulación del agua y de los peces. Pocas especies pueden realizar el salto, por ello la altura depende de la especie que transite en la zona. [11]

- *Pasos de estanques sucesivos con tabiques y escotadura libres*

La presencia de escotaduras o aperturas en los tabiques permite un paso continuo del caudal, estas aperturas se alternan en los tabiques y la altura de las escotaduras no debe ser superior a la mitad del tabique, el diseño es diferente para cada tipo de pez. [1] [12].

## 2. Escotadura semisumergida y orificio sumergido

Es similar al paso mencionado anteriormente, pero la comunicación entre estanques cambia, por presencia de orificios, produciendo una comunicación entre estanques con escotaduras sumergidas o semisumergidas. Este diseño es recomendable para familias de peces como truchas y salmónidos. [7]



**Figura N° 10:** Escalera de peces tipo artesa

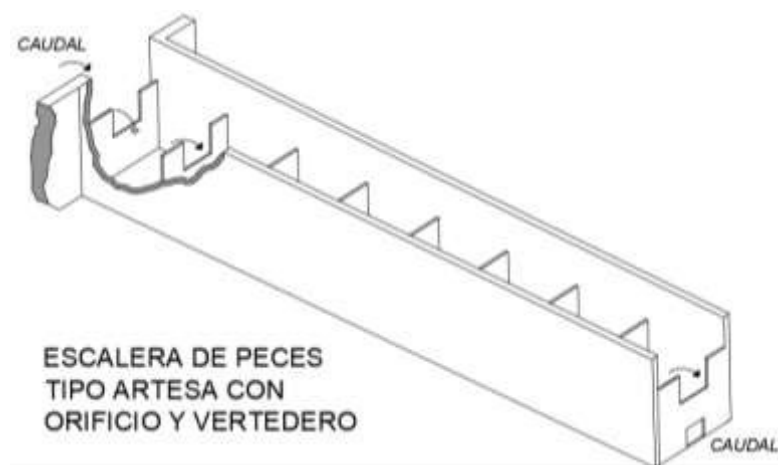
**Fuente:** ALNUS 2005, <https://www.alnus2005.com/otros-productos>.

- *Paso de estanques sucesivos con tabiques con escotadura sumergida*  
Generalmente las escotaduras se encuentran ubicadas en la parte lateral de los tabiques, de manera alternada para facilitar la transición del flujo y que los peces no tengan que saltar al cruzar la apertura. [7] [2]
- *Paso de estanques sucesivos con tabiques con orificios sumergidos*  
Posee un orificio, cuyas dimensiones dependen de varias características hidráulicas para el diseño y especie que circule por el área, su ubicación es en la parte inferior del tabique, por ello transporta un caudal sumergido. [7]
- *Paso de estanques sucesivos con tabiques con escotadura semisumergida y orificio sumergido.*  
Este diseño es una combinación de escotaduras y orificios de manera alternada, las escotaduras se encuentran en el centro o parte lateral del tabique mientras que el orificio se encuentra ubicado en el fondo de la pared del tabique. Generalmente se tiene caudales con poca turbulencia. [7] [2].

#### 1.4.3.6.2. Proceso de funcionamiento:

El funcionamiento de la escalera de peces de estanques sucesivos viene de la mano con la cantidad de estanques en las que se divide gracias a los tabiques en todo el largo de la escalera de peces. Las paredes son diseñados considerando las cotas de nivel, ya que esto influye directamente con la velocidad del caudal y es importante tener velocidades relativamente bajas para un buen comportamiento hidráulico de la obra, sin afectar las capacidades de los peces. [10] Para evitar daños en las especies se tiene el siguiente proceso de funcionamiento que se debe cumplir.

- La escalera de peces debe estar habilitada en todas las épocas del año, también se debe tener en cuenta las variaciones de flujos que puedan existir en la zona.
- Los accesos de entrada y salida deben estar ubicadas de manera estratégica, garantizando la movilidad de los peces.
- Flujo no turbulento y con velocidades bajas.



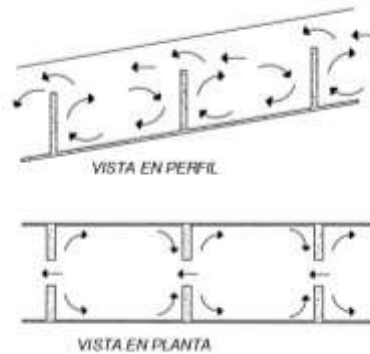
**Figura N° 11:** Funcionamiento de escalera de peces tipo artesa.

**Fuente:** Autoría

El flujo en este tipo de escaleras se comporta de dos formas;

1. *Flujo en profundidad*, va desde la superficie de cada tabique hacia el fondo del del tanque. El flujo que se forma es turbulento y ayuda a la disipación de la energía. El pez para atravesar el tabique debe saltar en la lámina de agua.

2. *Flujo a superficie*, se da al nivel del estrechamiento de las paredes que separan los estanques. La energía se disipa cuando el flujo cruza al siguiente estanque generando zonas de recirculación grandes



**Figura N° 12:** Movimiento del flujo en la escalera de peces tipo artesa.

**Fuente:** Autoría

#### **1.4.4. Características para estimar la efectividad de la escalera de peces.**

El diseño de una escalera de peces tipo artesa es efectivo cuando se cumplen las siguientes características: [3]

1. *Turbulencia:* Determinar si existe o no turbulencia en el diseño de los estanques, es importante ya que los peces requieren transportarse con velocidades relativamente bajas, evitando las agitaciones del flujo o turbulencias.
2. *Profundidad del estanque antes del salto:* Para conocer si la profundidad es efectiva, el pez debe conseguir suficiente impulso para atravesar el obstáculo al saltar.
3. *Altura del primer salto:* El primer salto del pez no puede ser mayor a sus capacidades de salto.
4. *Salto entre estanques:* Se toma en cuenta la distancia entre láminas de agua de los estanques.
5. *Ubicación:*
  - *Entrada del paso:* La localización debe ser fácil de encontrar para el pez, situada donde haya mayor atracción de las corrientes del flujo.
  - *Salida:* No se debe encontrar en aguas turbulentas, así se facilita la caída del pez y no se produce daños físicos al mismo.

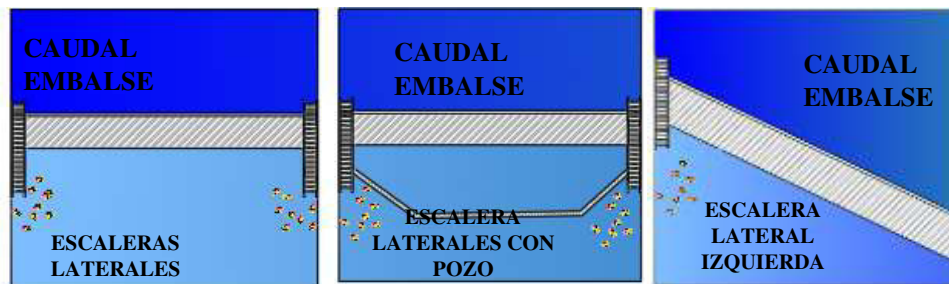
### 1.4.5. Ubicación de la escalera de peces

La ubicación de entrada para los peces en las escaleras tipo artesa varía, ya que es influenciada por la facilidad con la que los peces encuentran dicho acceso. Según la experiencia de los diseñadores, la escalera de peces generalmente se ubica en las orillas y zonas en donde la mayor cantidad de los peces se concentren. A continuación, se muestran figuras de las ubicaciones favorables y no favorables para este tipo de escalera.



**Figura N° 13:** Ubicación correcta, pero con problemas de acceso

**Fuente:** Autoría



**Figura N° 14:** Ubicación correcta

**Fuente:** Autoría

Las ubicaciones incorrectas o desfavorables:



**Figura N° 15:** Ubicaciones desfavorables para el acceso de peces.

**Fuente:** Autoría

#### 1.4.6. Peces que circulan en los ríos ecuatorianos.

Ecuador es un país rico en flora y fauna, posee una gran variedad de especies acuáticas que circulan en sus ríos, dependiendo de la especie y del tamaño, se considera la capacidad que tiene de nado y salto para cruzar las paredes de las estructuras hidráulicas creadas para su migración. [13].

##### 1.4.6.1. Capacidad de nado y salto:

La velocidad de nado influye en la trasladación de las especies, mientras mayor sea la velocidad de nado, más alto podrá ser su salto. [9]

Los peces poseen varios tamaños que varían dependiendo de su especie, su tamaño está relacionado con la velocidad de natación y altura de salto, las especies más influyentes en los ríos ecuatorianos para la escalera de peces tipo artesa son las truchas y el salmón. [1].

La escalera tipo artesa, debido a su diseño geométrico, facilita el paso de peces cuyo tamaño varía entre 12 y 75 cm. [11]

##### 1.4.6.2. Natación y resistencia:

Las distancias que generalmente recorre un pez dependen de la longitud corporal, es decir recorre maso menos 0.17 veces su talla y su velocidad está directamente relaciona a la capacidad de la aleta. [3]

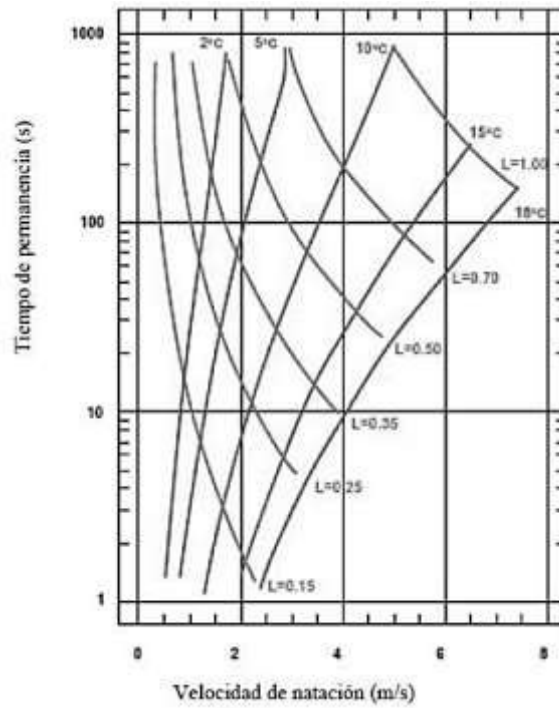
Las velocidades de los peces varían según las temperaturas en las que se encuentren, cuando la temperatura es caliente, los peces adoptan una velocidad mayor, mientras que cuando están en temperaturas frías, su velocidad es menor. [3]. Ver Tabla N° 1. [13].

**Tabla N° 1:** velocidades de natación de la Trucha y Salmon en función a la temperatura.

Especie	Talla (m)	Temp. (°C)	Vel máx. (m/s)	Tiempo (s)	Vel. Crucero (m/s)
Salmón	0.60-0.80	5	2.7-3.1	406-800	1.9-2.9
		10	3.7-4.3	120-315	1.95-2.95
		15	4.8-5.6	56-127	1.95-3.0
Trucha	0.25-0.35	5	1.65-2.0	20-53	0.5-0.8
		10	2.3-2.75	8-21	0.5-0.8
		15	2.9-3.5	4-11	0.5-0.8

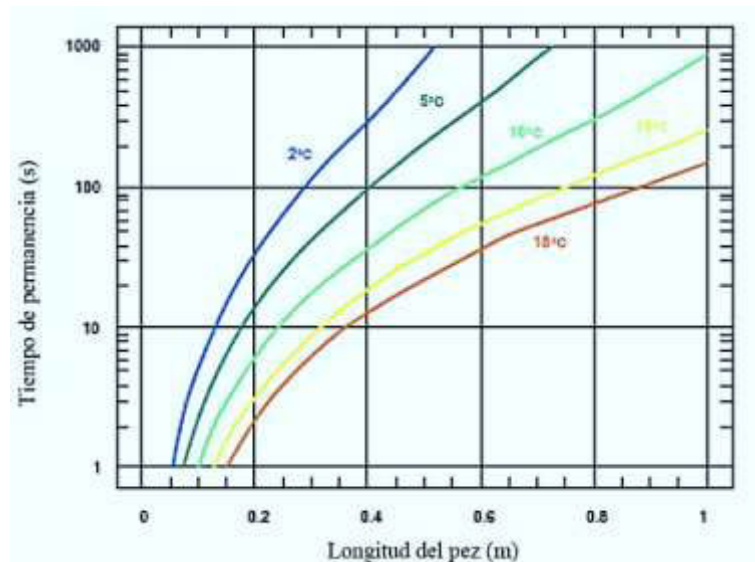
**Fuente:** Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (CEMAGREF, 1990).

A continuación, se muestran los ábacos que se utilizan para obtener la velocidad de nado, tipo de permanencia o resistencia del pez, según su tamaño y temperatura.



**Figura N° 16:** Velocidad de nado y tiempo de permanencia

**Fuente:** Base de diseño de estructuras en diques transversales para la captación del caudal ecológico. [2]



**Figura N° 17:** Tiempo de permanencia según la longitud del pez y temperatura

**Fuente:** Base de diseño de estructuras en diques transversales para la captación del caudal ecológico. [2]



#### **1.4.7. Factores influyentes en el diseño:**

Para el diseño de la escalera de peces se toma en cuenta los factores climáticos, geofísicos, abióticos entre otros que influyen en el diseño de la estructura que trasportara el caudal ecológico.

Los factores más comunes que se utilizan en el diseño de la escalera de peces se tiene los siguiente:

##### **1.4.7.1. Biológicos:**

Existen variedades de especies que cruzan la escalera de peces, de ello depende su diseño, ya que se toma en cuenta las capacidades de nado y salto, periodo de migración, profundidad mínima a la que el pez puede llegar, distancias recorridas y conocer su ciclo biológico. [1].

##### **1.4.7.2. Hidráulicos**

En la parte hidráulica se considera todo lo relacionado al caudal, velocidades de flujo, variaciones de calados, geometría de los elementos hidráulicos como orificios y vertederos, pendientes, tipos de flujo, coeficientes de rugosidad, disipación de energía, entre otros parámetros que son importantes para el diseño de una escalera de peces. [1] [10]

##### **1.4.7.3. Hidrológicos**

El factor hidrológico es de suma importancia se debe realizar un análisis de las características hidráulicas de la cuenca, del uso de los recursos hídricos y garantizar el mantenimiento del caudal ecológico, además se estudia los niveles de agua, ya que estos varían según las estaciones climáticas durante el año. [1]

##### **1.4.7.4. Topográficos**

La topográfica es uno de los factores del cual depende la elección de escalera de peces, si la topografía del terreno es muy accidentada se tiene pendientes grandes que influyen en la velocidad del flujo y por ende en su régimen, afectando directamente a la estructura

y ocasionando erosión en los dispositivos, por ello se debe tomar en cuenta la ubicación, geometría, condiciones de entrada y salida en las escaleras de peces. [10] [1]

#### **1.4.7.5. Gestión del agua.**

El uso de los recursos hídricos debe ser contralado y garantizado el mantenimiento del caudal ecológico y la gestión ambiental, tomando en cuenta las normas propuestas por la constitución y secretaria nacional del agua [4]

#### **1.4.8. Parámetros fundamentales de principios ecológicos.**

El transporte del caudal ecológico y conservación del ecosistema considera condiciones climáticas, geológicas, factores abióticos que influyen directamente con el transporte del caudal ecológico sin alterar demasiado el hábitat y ciclo de vida de los peces. Entre los factores más sobresalientes se tiene los siguientes:

##### **1.4.8.1. Geología y clima**

Ecuador es un país que tiene diferentes regiones ecológicas como son la costa, sierra y oriente o región andina, en cada región se tiene diferentes geología y clima, cambiando así las pendientes del terreno. [7]

##### **1.4.8.2. Temperatura**

La temperatura es un factor importante al momento de diseñar una escalera de peces, ya que la presencia de estructuras hidráulicas obstruye el paso del caudal, afectando las temperaturas del agua, modificando ciertas características físicas como la viscosidad. Si las temperaturas se incrementan a las normalmente soportadas por la especie, esto reduce la capacidad y tiempo de resistencia de la especie. [11]

Las temperaturas de las aguas ecuatorianas varían según la región y estación, en verano, desde diciembre a mayo, generalmente se tiene temperaturas de 23 a 30°C, mientras que en invierno se tiene aguas relativamente más frías en junio a noviembre con temperaturas de 15 a 21° C, esto también depende de la región en la que se realice el análisis. [13]

### 1.4.8.3. Velocidad del flujo

Para determinar las características ecológicas del agua se requiere de la velocidad del flujo de las corrientes de agua, importante para conocer las habilidades de las veces que nadan contra corriente. [2].

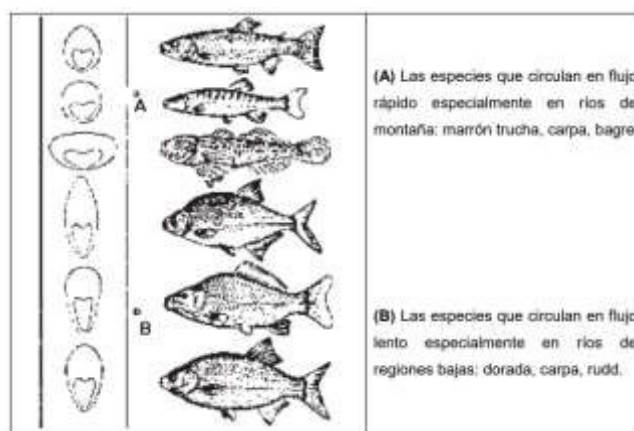
Según la experimentación de ensayos en laboratorios, se concluyó que no existe una velocidad óptima para todas las especies, esta varía dependiendo la especie y el tamaño del pez. [8]

### 1.4.8.4. Calidad del agua

El agua debe volver a sus condiciones originales, es decir debe recuperar su temperatura y oxígeno. También se debe verificar que en el cauce no exista la presencia de sustancias tóxicas o material sedimentario principalmente en los accesos a la escalera de peces ya que esto obstruye el paso del flujo y de los peces. [11]

### 1.4.8.5. Adaptación de los peces

Las variaciones del flujo a las que se someten los peces son cambiantes, se encuentran adaptados a su hábitat, por lo que pueden movilizarse libremente, rompiendo las velocidades de flujo. [2] Generalmente usan las profundidades como escondite para liberarse de las velocidades del flujo en temporada de crecidas. [5]

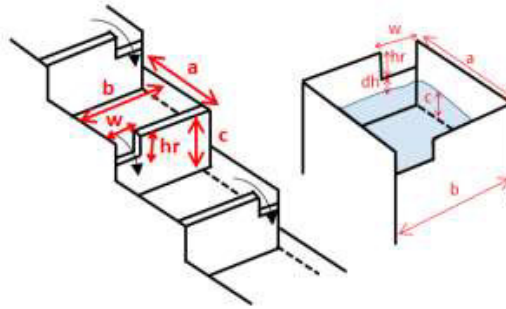


**Figura N° 18:** Información corporal de los peces

**Fuente:** Fish Passes, Design Dimensions and monitoring, Rome, 2002, Shua, 1970 [2]

#### 1.4.9. Característica de diseño:

En el diseño de la estructura de paso, escalera tipo artesa, toma en cuenta ciertas características hidráulicas, geométricas y biológicas de las especies, entre ellas está la velocidad de nado, altura del salto, el tamaño del pez, temperatura del agua, caudal que cruza por la estructura, pendientes, el tamaño de los diques, longitud de la escalera de peces, ancho del vertedero y dimensiones del oficio



**Figura N° 19:** geometría y partes de la escalera

**Fuente:** Diseño de escalera para peces [10]

##### 1.4.9.1. Caudal

Es necesario estimar el caudal de diseño para implementar cualquier obra hidráulica, este se estima según las estadísticas de frecuencias de las crecidas y el caudal necesario que requieren las especies acuáticas al pasar por la estructura hidráulica. [8]. El caudal debe cumplir con las condiciones ambientales óptimas para las especies de la zona y así permitir el paso libre de los peces, para que se cumpla el traslado del caudal ecológico se debe conocer el caudal mínimo de navegación y atracción de peces. [2] [7]. El caudal que ingresa a la escalera de peces no debe producir mucha turbulencia y se debe verificar que la disipación de energía no sea mayor a los  $200\text{W/m}^3$ , la velocidad del flujo no debe ser mayor a  $2\text{ m/s}$  y la superficie de la escalera de peces debe ser áspera y generar fricción para reducir la velocidad del flujo. [2]

##### **Criterios:**

- En escaleras con orificios y vertederos, se usan caudales recomendados entre **250** y **700 l/s**.
- El caudal de diseño puede coincidir con el caudal ecológico e incluso puede ser inferior.

#### 1.4.9.1.1. Caudal ecológico

El caudal ecológico se estima con el 10 % del caudal medio anual, mencionado en el apartado 1.4.1, del documento, a continuación, se muestra la Ecuación N° 1.

$$Q_e = 10 \% * Q_m$$

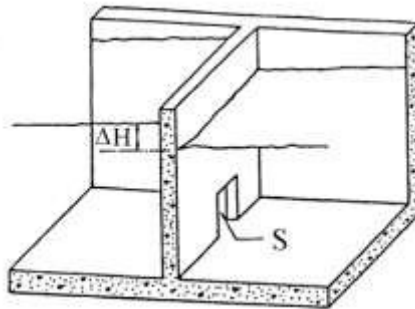
**Ecuación N° 1.** Caudal ecológico

Donde:

Q<sub>e</sub>: caudal ecológico (m<sup>3</sup>/s)

Q<sub>m</sub>: caudal promedio anual (m<sup>3</sup>/s)

#### 1.4.9.1.2. Caudal a través de un orificio



**Figura N° 20:** Caudal a través de un orificio

**Fuente:** Fuente: Danny rojas y Héctor Tarambies [2]

Para determinar el caudal que atraviesa por el orificio de la escalera de peces, se utiliza la Ecuación N° 2 que se muestra a continuación. [10]

$$Q_o = cd * A_s * \sqrt{2g\Delta h}$$

**Ecuación N° 2.** Caudal a través de un orificio

Donde:

Q<sub>o</sub>: caudal a través del orificio (m<sup>3</sup>/s)

A<sub>s</sub>: Área del orificio (m<sup>2</sup>)

g: gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>)

Δh: Salto de agua (m)

Cd: Coeficiente adimensional de descarga oscila entre:

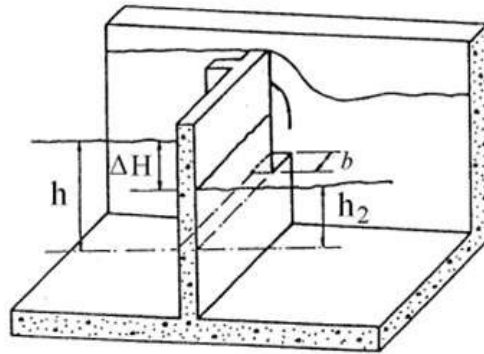
0.65 y 0.85 para orificios regulares

0.65 aristas vivas

0.85 aristas redondeadas

#### 1.4.9.1.3. Caudal a través de un vertedero

- o Vertedero sumergido



**Figura N° 21:** Caudal a través de un vertedero- sumergido

**Fuente:** Fuente: Danny rojas y Héctor Tarambies [2]

$$Q = \frac{2}{3} * k * cd * b * \sqrt{2g * \Delta h}$$

**Ecuación N° 3.** Caudal en vertedero sumergido

Donde:

Q: caudal a través del vertedero

b: ancho del vertedero (m)

g: gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>)

h: carga de vertido (m)

Cd: Coeficiente adimensional de descarga oscila entre:

- 0.58 y 0.75y valor recomendado de 0.62
- 0.58 vertedero en pared gruesa
- 0.75 vertedero de pared delgada

K: es un factor menor, se determina con la Ecuación N° 4 que se muestra a continuación:

$$k = \left[ 1 - \left( \frac{h - \Delta h}{h} \right)^{1.5} \right]^{0.385}$$

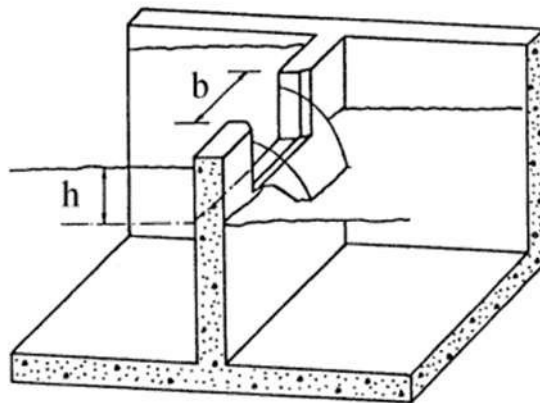
**Ecuación N° 4.** factor K

Para la aplicación de la Ecuación N° 4 del vertido sumergido debe cumplirse la Ecuación N° 5, si la diferencia de alturas se encuentra entre 0.5 a 0.9 entonces el vertedero trabaja sumergido, y se usan las ecuaciones correspondientes. [10].

$$0.5 \leq \left( \frac{h - \Delta h}{h} \right) \leq 0.9$$

**Ecuación N° 5** de verificación para vertedero libre y vertedero sumergido.

- Vertedero a superficie libre



**Figura N° 22:** Caudal a través de un vertedero- superficie libre

**Fuente:** Danny rojas y Héctor Tarambies [2]

El caudal que atraviesa por el vertedero rectangular a superficie libre tiene la Ecuación N° 6 y el coeficiente de descarga se toma según el grosor de la pared del vertedero, para este tipo de escalera de peces se recomienda adoptar el valor de 0.4. [10]

$$Q = \frac{2}{3} * cd * b * \sqrt{2g * \Delta h}$$

**Ecuación N° 6.** Caudal de vertedero rectangular a superficie libre

Donde:

Q: caudal a través del vertedero

b: ancho del vertedero (m)

g: gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>)

h: carga de vertido (m)

Cd: Coeficiente adimensional de descarga oscila entre:

- 0.58 y 0.75y valor recomendado de 0.62
- 0.58 vertedero en pared gruesa
- 0.75 vertedero de pared delgada

#### 1.4.9.1.4. Caudal a través de un orificio y vertedero

En la estructura mixta, el caudal se comparte entre el vertedero y el orificio, mediante un parámetro de caudal adimensional que ayuda a corregir el caudal que atraviesa por cada estructura, para ello se utilizan las siguientes ecuaciones: [3]

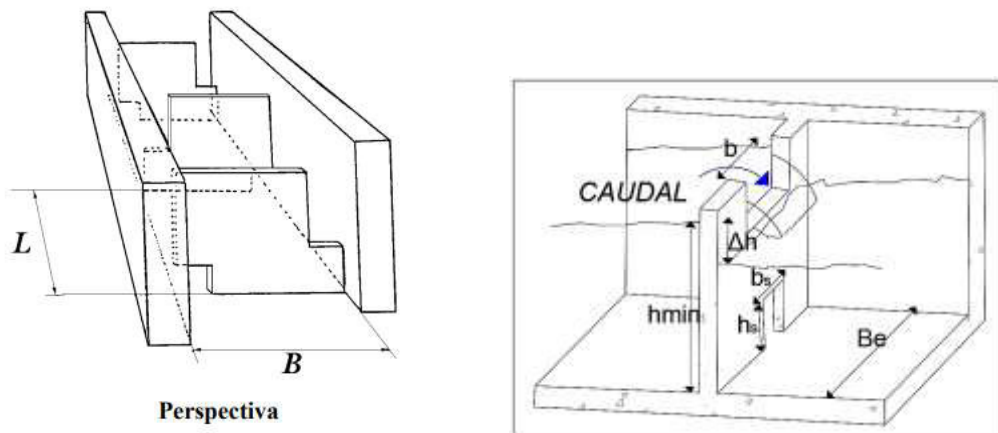


Figura N° 23: Caudal a través de un orificio y vertedero

Fuente: Danny Rojas y Héctor Tarambies [2]

##### 1.4.9.1.4.1. Caudal en el orificio:

$$Q_o = Q_j * (g * S * b_s^5)^{0.5}$$

Ecuación N° 7. Caudal en el orificio de una escalera mixta.



Donde:

Qo: Caudal a través del orificio (m<sup>3</sup>/s)

Qj: Caudal adimensional orificio sumergido (2.25)

S: Pendiente del estanque (%)

g: Gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>)

bs: Ancho del orificio (m)

#### 1.4.9.1.4.2. Caudal en vertedero sumergido:

$$Q_{vs} = Q_p * B * \Delta h^{\frac{3}{2}} * \sqrt{g}$$

**Ecuación N° 8.** Caudal en el vertedero sumergido

Donde:

Qvs: Caudal a través del vertedero con descarga a sumergida (m<sup>3</sup>/s)

Qp: Caudal adimensional vertedero sumergido (0.61)

B: Ancho del estanque (m)

S: Pendiente del estanque (%)

$\Delta h$ : altura de salto entre artesas recomendada (0.2m)

#### 1.4.9.1.4.3. Caudal en vertedero a superficie libre:

$$Q_{vl} = Q_s * B * \Delta h^{\frac{3}{2}} * \sqrt{g * S}$$

**Ecuación N° 9.** Caudal en el vertedero a superficie libre

Donde:

Qvl: Caudal a través del vertedero con descarga libre (m<sup>3</sup>/s)

B: Ancho del estanque (m)

g: Gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>)

S: Pendiente del estanque (%)

$\Delta h$ : altura de salto entre artesas recomendada (0.2m)

Qs: Caudal adimensional vertedero sumergido

El caudal adimensional del vertedero a descarga libre se determina con la Ecuación N° 10.

$$Q_s = 1.50 * \sqrt{\frac{L_e}{\Delta h}}$$

**Ecuación N° 10.** Caudal adimensional para vertedero - sumergido

#### **1.4.9.1.4.4. Caudal total de la escalera con orificio y vertedero.**

El caudal para una estructura mixta se obtiene sumando los caudales de cada estructura que se encuentre en el tabique de la escalera, es decir vertedero y orificio, para ello se aplica la Ecuación N° 11. Todos los parámetros de diseño para cada estructura son los ya mencionados en el apartado 1.4.9.1.4.

$$Q_{mixt} = Q_o + Q_v$$

**Ecuación N° 11.** Caudal total a través de una estructura mixta

Donde:

Qmixt: caudal total que pasa a través del orificio y vertedero (m<sup>3</sup>/s)

Qot: caudal a través del orificio (m<sup>3</sup>/s)

Qvt: caudal a través del vertedero (m<sup>3</sup>/s)

#### **1.4.9.2. Desnivel de cotas o altura total (htotal)**

La altura total es la diferencia de cotas de entrada y salida de la escalera de peces.

$$H_{TOTAL} = h_1 - h_2$$

**Ecuación N° 12.** Diferencia de cotas

Donde.

h1: cota de entrada (msnm)

h2: cota de salida (msnm)

#### **1.4.9.3. Número de estanques (N)**

El número de estanques que se repartirán a lo largo de la escalera depende del desnivel provocado por la represa y la altura de salto entre artesas

$$N^{\circ} = \frac{H_{TOTAL}}{\Delta h} - 1$$

**Ecuación N° 13.** Número de estanques

Donde:

N°: número de artesas (-)

HTOTAL: Desnivel provocado por la represa (msnm)

$\Delta h$ : altura de salto entre artesas recomendada (0.2m)

#### 1.4.9.4. Salto mínimos:

En caso de existir variaciones de nivel aguas abajo, se recomienda calcular el salto mínimo ocupando la siguiente Ecuación N° 14.

$$\Delta h_{min} = \frac{H_{TOTAL}}{N^{\circ} + 1}$$

**Ecuación N° 14.** Salto mínimo

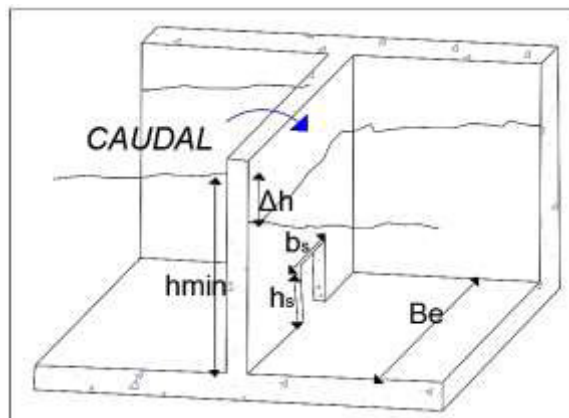
Donde:

N°: número de artesas (-)

HTOTAL: Desnivel provocado por la represa (msnm)

$\Delta h_{min}$ : altura de salto mínimo (0.2m)

#### 1.4.9.5. Dimensionamiento del orificio rectangular



**Figura N° 24:** Partes de un orificio rectangular

**Fuente:** Autoría

#### **1.4.9.5.1. Tamaño mínimo de los orificios (Cd)**

El tamaño de los orificios rectangulares con cargas bajas varia de 0.65 a 0.85, se recomienda tomar un valor promedio de 0.75. [10]

#### **1.4.9.5.2. Altura y base del orificio**

La altura ( $h_s$ ) y base ( $b_s$ ) del orificio se obtiene aplicando la siguiente ecuación.

$$A_s = h_s * b_s$$

**Ecuación N° 15. Área del orificio**

El orificio es cuadrangular cuando se tiene las siguientes dimensiones

$$A_s = (b_s)^2$$

$$h_s = b_s$$

$$b_s = \sqrt{A_s}$$

Donde:

As: Area del orificio (m<sup>2</sup>)

Hs: altura del orificio (m)

Bs: ancho del orificio (m)

#### **1.4.9.5.3. Velocidad en el orificio**

La velocidad del orificio se determina con la siguiente ecuación.

$$V_o = \frac{Q_o}{A_s}$$

**Ecuación N° 16. Velocidad en el orificio**

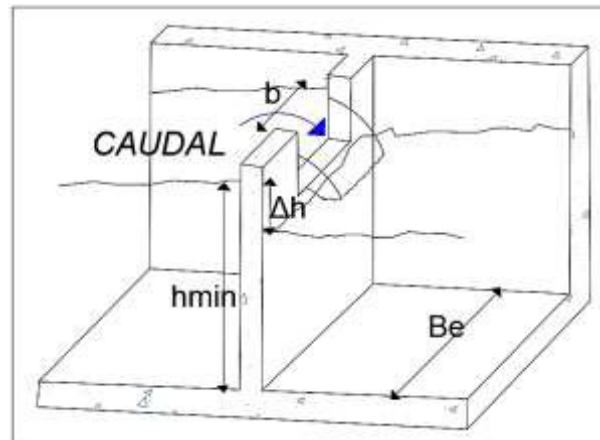
Donde:

Vo= velocidad en el orificio recomendada menor a 2 m/s

Qo = caudal que atraviesa el orificio (m<sup>3</sup>/s)

As = área del orificio (m<sup>2</sup>)

#### 1.4.9.6. Dimensionamiento del vertedero



**Figura N° 25:** Partes de un vertedero rectangular

**Fuente:** Autoría

La Tabla N° 2, es una tabla de resumen obtenida de las recomendaciones mencionadas en el subcapítulo 1.4.9, en donde se encuentran valores para el diseño de la escalera de peces tipo artesa con vertedero, este puede ser sumergido o a superficie libre.

**Tabla N° 2:** Valores recomendados para el diseño de la escalera de peces tipo artesa con vertedero.

VERTEDERO						
ESPECIE	$\Delta h_{max}$ (m)		$b_{min}$ (m)		VELOCIDAD	Cd (-)
	LIBRE	SUMERGIDO	LIBRE	SUMERGIDO		
SALMÓN	0.3 - 0.6	0.45 - 0.3	$b=B$	0.3	3.4	0.58 - 0.75
TRUCHA	0.20 - 0.45	0.3 - 0.25	$b=B$	0.2	3	
SABALO	0.2	0.2 - 0.3	$b=B$	0.45	2.4	
OTROS-PEQUEÑOS	0.2	0.15-0.25	$b=B$	0.45	1.7	0.62

##### 1.4.9.6.1. Desnivel entre depósitos consecutivos ( $\Delta h$ )

Permite o dificulta el paso de las especies. [10]

*Vertedero libre:* Se aplica para especies que saltan fuera del agua,  $\Delta H = 0.3m$

- Salmón  $\Delta H_{max} = 0.6$  m
- Trucha  $\Delta H_{max} = 0.45$  m

*Vertedero sumergido:* Solución más empleada, favorable para todos los tamaños de peces.

- Salmón y trucha  $\Delta H: 0.3 - 0.4$  m
- Trucha y barbo  $\Delta H: 0.25 - 0.3$  m
- Sábalo  $\Delta H: 0.2 - 0.3$
- La mayoría de los peces  $\Delta H: 0.15 - 0.25$

#### 1.4.9.6.2. Ancho de vertederos (*b*)

Para determinar el ancho del vertedero se considera la Ecuación N° 17 visto que ya se tiene las alturas de los vertederos, caudal que transita por la escalera y la altura del salto entre artesas, solo queda despejar la constante *b* y se obtiene el ancho del vertedero. [10].

$$b = \frac{Q_e}{h_r * \sqrt{2gd_h}}$$

**Ecuación N° 17.** Ancho de vertederos

**Donde:**

Q<sub>e</sub>: Caudal en escalera de peces (m<sup>3</sup>/s)

g: Gravedad (m/s<sup>2</sup>)

Δh: Salto de agua (m)

h<sub>min</sub>: Altura del vertedero

*b*: ancho de los vertederos

#### 1.4.9.6.3. Ancho mínimo de vertedero (*b<sub>min</sub>*)

El ancho mínimo del vertedero depende de la especie y se diseña para evitar aglomeraciones de peces, debe respetarse

- *Vertedero sumergido*

El vertedero sumergido considera que el ancho mínimo de vertedero debe ser mayor a 0.15m como se muestra en la Ecuación N° 18. El ancho varía según la especie de los peces que atraviese el vertedero, a continuación, se encuentran los anchos recomendados para diferentes especies de peces. [10]

$$b_{min} > 0.15 \text{ m}$$

**Ecuación N° 18.** Ancho mínimo de vertedero

- Truchas  $b_{\min}$  :0.2m
- Salmon  $b_{\min}$  :0.3m
- Sabalo  $b_{\min}$  :0.45m

- *Vertedero libre:*

Se usa el ancho mínimo igual al ancho del vertedero sin contracciones laterales [10], ver Ecuación N° 19.

$$B = b_{\min}$$

**Ecuación N° 19.** Ancho mínimo igual al ancho de vertedero sin contracciones laterales.

**1.4.9.6.3.1. Criterios de verificación:**

Para verificar el correcto dimensionamiento del vertedero se debe realizar la revisión de la Ecuación N° 20, si la relación  $Be/b$  se encuentra dentro de los parámetros, el dimensionamiento es correcto caso contrario se debe modificar el diseño.

$$4 \leq \frac{Be}{b} \leq 6$$

**Ecuación N° 20.** Ancho del estanque y Ancho del vertedero

**1.4.9.6.4. Altura del umbral del vertedero ( $w$ )**

Se trabaja con una altura entre 0.6 y 1 m de la cresta del vertedero. [10] .

**1.4.9.6.5. Altura mínima del estanque en vertedero ( $h_{\min}$ )**

La altura mínima del estanque para un vertedero depende de la especie que cruce la estructura, a continuación, se muestran las alturas mínimas recomendadas para cada pez. [10]

- Truchas  $h_{\min}$  :0.6m
- Salmon  $h_{\min}$  :1 m
- Sabalo  $h_{\min}$  :0.8m

#### 1.4.9.6.6. Velocidad en el vertedero:

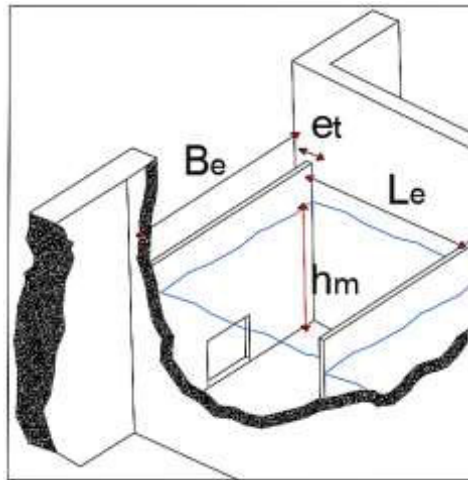
La velocidad del flujo en el interior del vertedero se recomienda que no sea mayor a 3.5m/s. y para su cálculo se utiliza la siguiente Ecuación N° 21. [10]

$$Vv = \frac{Qv}{b * \Delta h}$$

**Ecuación N° 21.** Velocidad en el vertedero

- $\Delta h = 0.15 - V = 1.7 \text{ m}$
- $\Delta h = 0.30 - V = 2.4 \text{ m}$
- $\Delta h = 0.45 - V = 3 \text{ m}$
- $\Delta h = 0.60 - V = 3.4 \text{ m}$

#### 1.4.9.7. Dimensionamiento del estanque



**Figura N° 26:** Partes del estanque

**Fuente:** Autoría

#### 1.4.9.7.1. Ancho del estanque (Be)

El ancho  $Be$  es el ancho total que cubre el estanque en la escalera de peces, en la Tabla N° 3 se encuentran los anchos recomendados según el tamaño del pez.



#### 1.4.9.7.2. Calado mínimo del estanque

Es la profundidad mínima del calado, este valor garantiza que los peces no se maltraten cuando atraviesan los diques.

$$h_{min} = h + \frac{\Delta H}{2}$$

**Ecuación N° 22.** Calado mínimo del estanque

Donde:

hm: calado mínimo (m)

Lc: longitud corporal del pez (m0)

Δh: salto de agua (m)

h: profundidad de agua hasta el sustrato, se obtiene con la siguiente ecuación.

$$h = Lc + 0.25$$

**Ecuación N° 23.** Profundidad de agua hasta el sustrato

#### 1.4.9.7.3. Longitud del depósito (Le)

Al existir excesos de espacio entre los estanques, se pueden desarrollar remolinos en las aguas muertas, por ello es importante el correcto dimensionamiento de los estanques.

Para obtener la longitud del estanque se hace uso de la **Ecuación N° 24** y en la **Tabla N° 3** se pueden ver las recomendaciones para el dimensionamiento del estanque.

$$L_e = \frac{\rho * g * \Delta h * Q}{B_e * h_w * E} + e_t$$

**Ecuación N° 24.** Longitud del estanque

Donde:

Q: caudal que circula (m3/s)

ρ: Densidad del agua (1000 kg/m3)

Be: ancho del estanque (m)

Le: longitud del estanque (m)

et: espesor del tabique (0.15m)

$\Delta h$ : altura de salto entre artesas recomendada (0.2m)

E: energía disipada, no mayor a 200W/m<sup>3</sup>

Según las especies que transitan en la escalera de peces se tiene las siguientes recomendaciones en la potencia disipada.

- Truchas  $P \leq 175 \text{ W/m}^3$
- Salmon  $P \leq 200 \text{ W/m}^3$
- Sábalo  $P \approx 100 - 125 \text{ W/m}^3$

#### 1.4.9.7.4. *Espesor de las paredes o diques (et)*

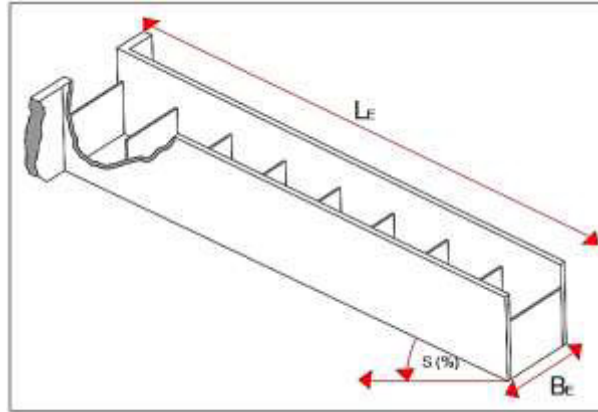
El espesor de las paredes depende del bloque de cemento que se usará en la construcción, por ello es recomendable que el valor sea 0.15 m.

En la Tabla N° 3 se presenta los valores recomendados para el dimensionamiento del estanque según la longitud del pez.

**Tabla N° 3** Dimensiones del estanque según el tamaño de pez.

ESTANQUES				
TAMAÑO DEL PEZ	Dimensiones del estanque (m)			Caudal max en la escalera de peces tipo artesa
	Longitud (Le)	Ancho (Be)	Profundidad (Y)	
Mayor a 0.7	5 - 6	2.5 - 3	1.5 - 2	2.5
0.7 - 0.3	2.5 - 3	1.6 - 2	0.8 - 1.0	0.2 - 0.5
0.3 - 0.15	1.4 - 2	1.0 - 1.5	0.6 - 0.8	0.08 - 0.2
Menor a 0.15	> 1.0	> 0.8	> 0.6	0.05 - 0.1

#### 1.4.9.8. Dimensionamiento de la escalera:



**Figura N° 27:** Partes de la escalera de peces

**Fuente:** Autoría

#### **1.4.9.8.1. Pendiente media de la escalera (S)**

Las pendientes de las escaleras de peces tipo artesa varían desde 5% hasta 10%, considerando caudales de diseño inferiores a 100 L/s. [7]

$$S = \frac{\Delta h}{L_e}$$

**Ecuación N° 25.** Pendiente de la escalera de peces.

Donde:

S: pendiente (%)

$\Delta h$ : altura de salto entre artesas recomendada (0.2m)

$L_e$ : longitud del estanque (m)

#### **1.4.9.8.2. Longitud de la escalera ( $L_e$ )**

La longitud de la escalera de peces va a depender del número de artesas y del desnivel provocado por la presa (H). Para el cálculo de la longitud se toma en cuenta la pendiente, profundidad, el ancho, caudal, capacidades de los peces entre otros, por lo tanto, se utiliza la Ecuación N° 26, pero antes se debe verificar que no se encuentre lejos de la obstrucción ya que esto disminuye su eficiencia.

$$L_E = L_e * N^\circ$$

**Ecuación N° 26.** Longitud total de la escalera de peces

Donde:

$L_E$ : longitud total de la escalera de peces (m)

$L_e$ : longitud del estanque (m)

$N^\circ$ : número de estanques

#### **1.4.9.8.3. Velocidad de entrada ( $V_a$ )**

Para determinar la velocidad en la entrada de la escalera de peces, se debe toma en cuenta la altura de salto ( $\Delta h$ ) que generalmente en peces es de 0.15m y 0.4m y la velocidad  $V_a$  se encuentra en el rango de 0.8 a 2m/s. [1]

$$V_a < \sqrt{2g\Delta h}$$

**Ecuación N° 27.** Velocidad máxima de entrada

#### **1.4.9.8.4. Distancia recorrida por el pez**

La distancia recorrida el pez debe ser mayor a la longitud del estanque, en el caso de no cumplir con el requerimiento  $D_r > L_e$  se debe recalculer las dimensiones de la escalera. [2]

$$D_r = (V_n - V_a) * t_p$$

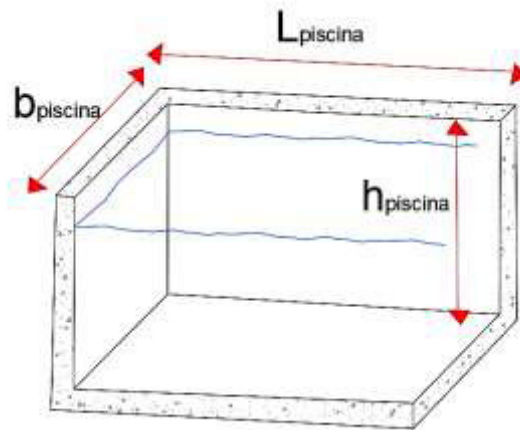
**Ecuación N° 28.** Distancia recorrida por el pez

$V_n$ : velocidad de nado

$t_p$ : tiempo de permanencia

#### **1.4.9.9. Dimensiones de la piscina de entrada y salida**

Para que los peces tengan facilidad de acceso se recomienda la elaboración de una rampa con una pendiente máxima de 45°e



**Figura N° 28:** Partes de la Piscina

**Fuente:** Autoría

**1.4.9.9.1. Longitud de la piscina**

La longitud de la piscina a la salida es 7 a 10 veces la variación total de cotas.

$$L_{piscina} = 7 \text{ o } 10 * H_{TOTAL}$$

**Ecuación N° 29.** Longitud de la piscina

**1.4.9.9.2. Ancho de la piscina**

El ancho de la piscina es igual al ancho del estanque más uno, como se muestra en la Ecuación N° 30.

$$b_{piscina} = B_e + 1$$

**Ecuación N° 30.** Ancho de la piscina

**1.4.9.9.3. Profundidad de la piscina a la entrada**

La profundidad de la piscina a la entrada se mide desde la parte inferior del último tabique de la escalera, no debe ser menor a 1m.

$$h_{piscina} = \frac{1}{3} \text{ o } \frac{1}{2} * H_{TOTAL}$$

**Ecuación N° 31.** Profundidad de la entrada de la piscina

## **2 METODOLOGÍA**

### **2.1. Introducción**

En este capítulo se muestra el desarrollo del diseño de la herramienta computación en macros Excel, realizada con ayuda de la información recopilada y detallada en el marco teórico, misma que permite el dimensionamiento de la escalera de peces tipo artesana.

En el software de macros se almacena la información de datos permitiendo así el análisis de estos para facilitar los procesos de cálculo y permitir en menor tiempo un prediseño del dimensionamiento de la escalera de peces.

A continuación, se muestran las fases de revisión y análisis de las fuentes de información, el lenguaje de programación y diseño de la herramienta computacional.

#### **2.1.1. Revisión de la información**

Los aportes teóricos utilizados para el desarrollo y cumplimiento de los objetivos planteados han sido obtenidos de varias fuentes de investigación, entre ellas se tienen: Libros, Artículos, Tesis, Documentos de internet y Páginas web.

#### **2.1.2. Análisis de información**

Se realiza el análisis del marco teórico, especialmente la información que se encuentra en el apartado 1.4.9. donde se muestran todas las ecuaciones y parámetros de diseño sobre el tema desarrollado.

En el apartado 1.4.3.6 se encuentra la definición la estructura de paso en análisis, desde el subcapítulo 1.4.4 hasta el 1.4.8. se presenta temas relevantes para el proyecto como las características de eficiencia, criterios de diseño, recomendaciones de la ubicación de la escalera, factores influyentes, etc.

#### **2.1.3. Lenguaje de programación**

Macros en Excel es un conjunto de instrucciones que sirve para automatizar procesos o tareas, estas instrucciones se guardan mediante una combinación de teclas o botones. El lenguaje de programación que se utiliza es Visual Basic for Application (VBA), este permite introducir tareas, que son procesadas, almacenadas y transmitidas. [14]

## 2.2. Diseño de la herramienta computacional en macros de Excel

El diseño de la herramienta computacional facilita el dimensionamiento de la escalera de peces tipo artesa, para ello se realiza una interfaz que funciona a través de un código desarrollado en el lenguaje Visual Basic for Application en macros de Excel. Para verificar que el código funciona correctamente, se realizan pruebas, ingresando datos de un ejemplo previamente realizado. Con ayuda de un diagrama de flujo se describe el algoritmo informático y los procesos a seguir en la herramienta computacional.

- **Algoritmo informático**

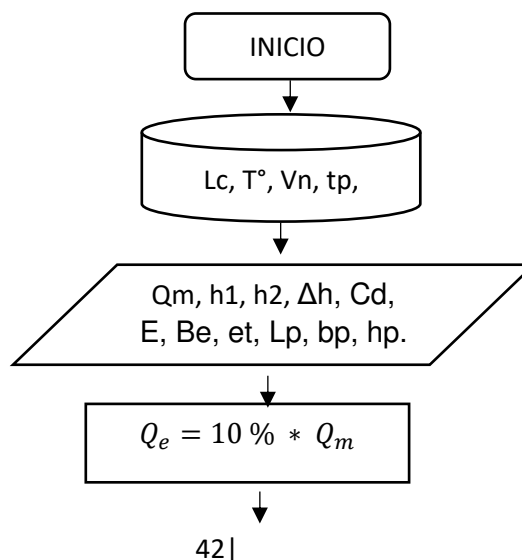
Es un conjunto de procedimientos computacionales que se encuentra definido en tres partes principales (entrada, proceso y salida), aplicados en secuencia ordenada hasta llegar a la solución del objetivo. En el diagrama de flujo se puede observar dicho procedimiento. [14].

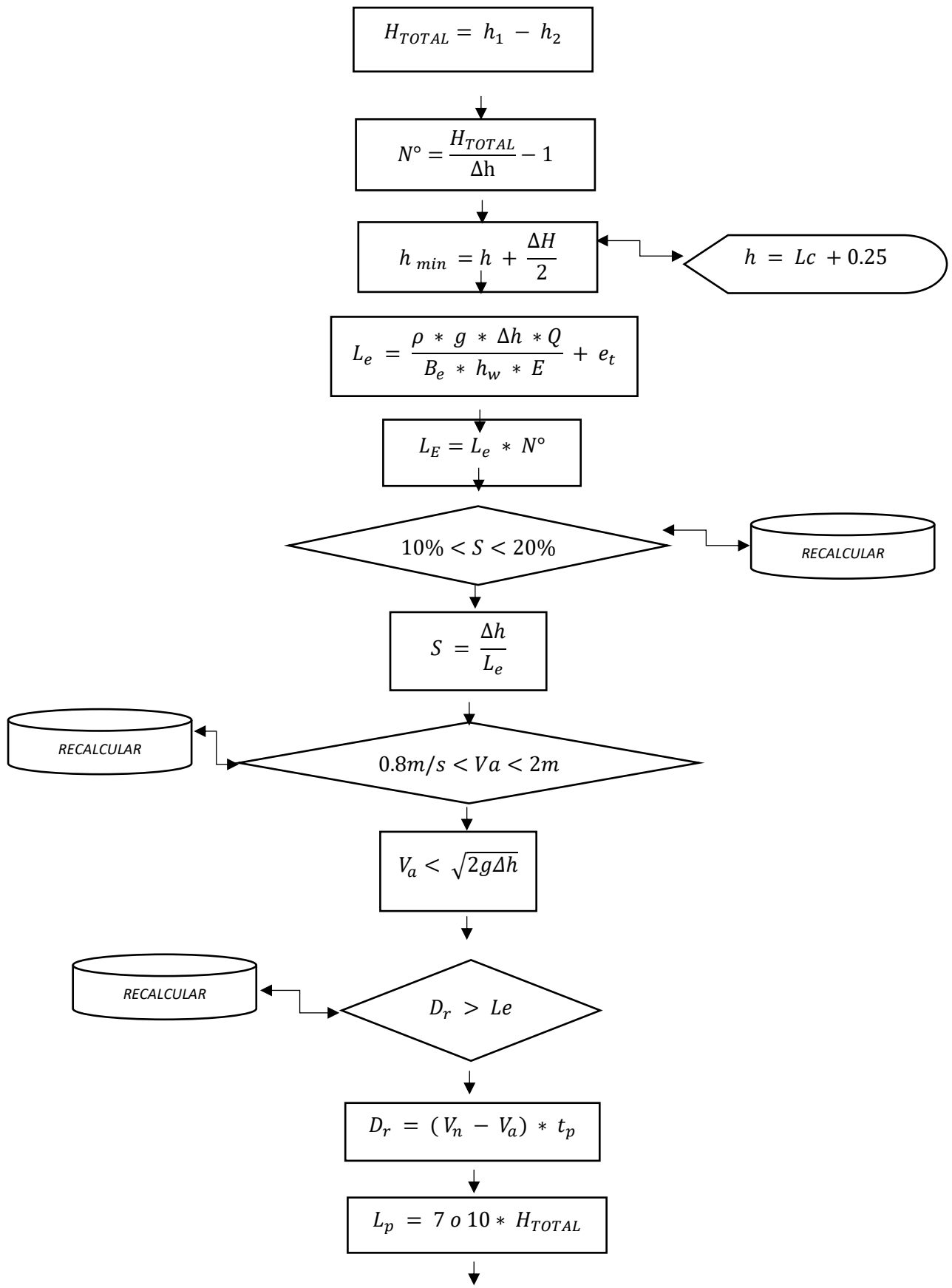
- **Procedimiento para el diseño de la herramienta**

Para inicial el desarrollo de la herramienta computacional en macros se debe tener claro cuál es el formato o diseño de la interfaz, elementos que se agregaran y conocimiento del lenguaje de programación para no tener problemas en la compilación del código. [14].

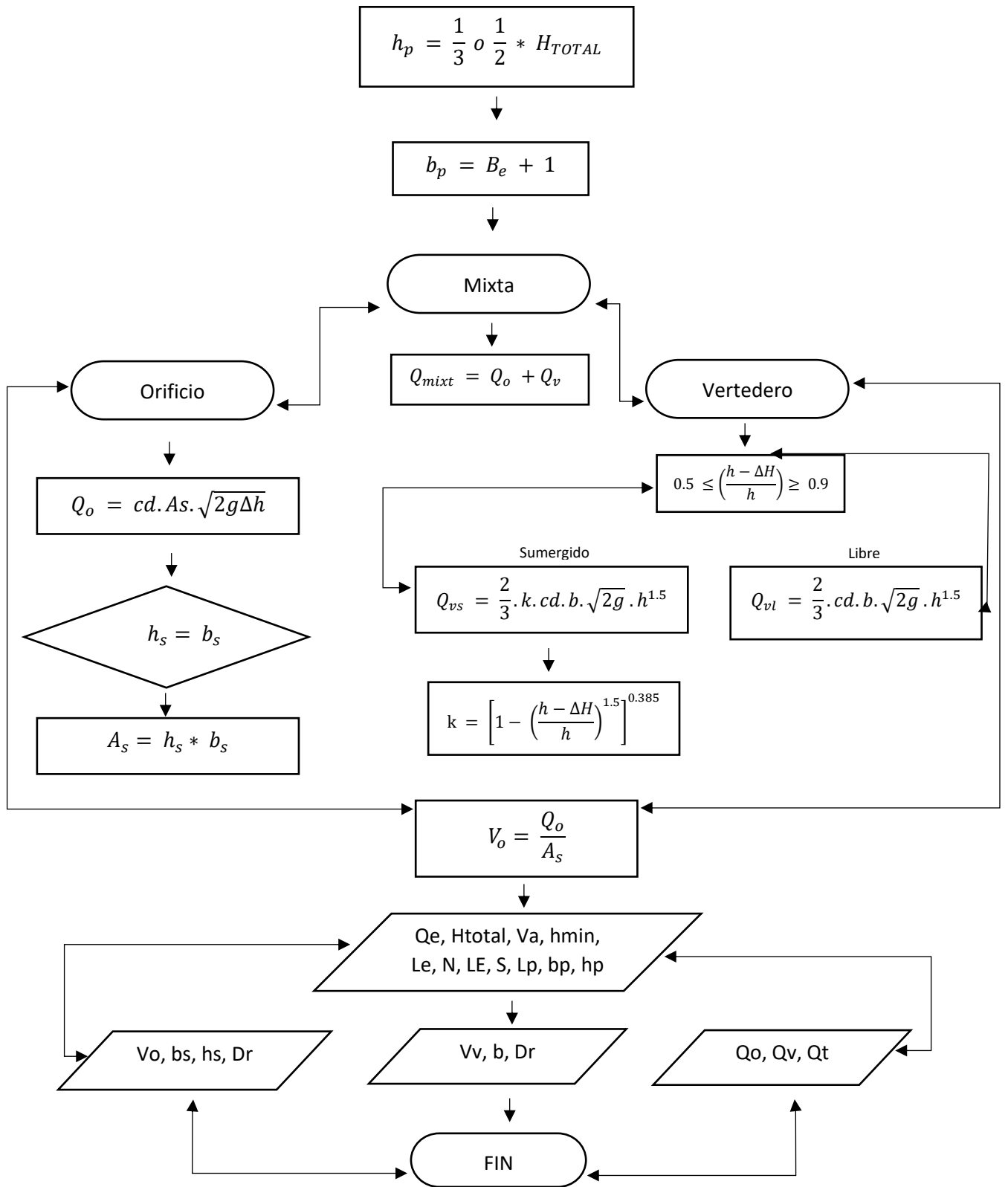
### 2.2.1. Diagrama de flujo

Para la herramienta "escalera de peces tipo artesas" se tiene el siguiente diagrama de flujo:









### **2.2.2. Pasos para la creación de la escalera de peces:**

Para el dimensionamiento de la escalera de peces se debe seguir ciertos pasos ubicados en orden consecutivo, para facilitar la programación, estos son:

#### **Datos de las especies:**

Se debe conocer la longitud aproximada del pez que pasará por la escalera de peces, al igual que la temperatura promedio del río, según su ubicación y estación del año. Conociendo la longitud del pez y temperatura del agua se puede obtener la velocidad de natación y tiempo de permanencia, en los ábacos correspondientes, para luego continuar con los cálculos para el dimensionamiento de la escalera.

#### **Datos de diseño:**

Se define las cotas aguas arriba y aguas abajo de la escalera, caudal medio anual, salto de agua, energía disipada, coeficiente de descarga según la estructura implementada, es decir, si se está diseñando con orificio o vertedero, en el apartado 1.4.9.1.2. para orificios y 1.4.9.1.3. para vertederos.

#### **Datos resultantes:**

En los datos resultantes se obtiene la profundidad o calado mínimo de los estanques, longitud del estanque, pendiente de la escalera de peces, longitud total de la escalera de peces y su respectiva velocidad, dimensiones de la piscina de entrada y salida de la escalera de peces y finalmente, determinar el dimensionamiento de las estructuras colocadas en los diques, es decir, orificio, vertedero o mixta.

### **2.2.3. Creación de la interfaz.**

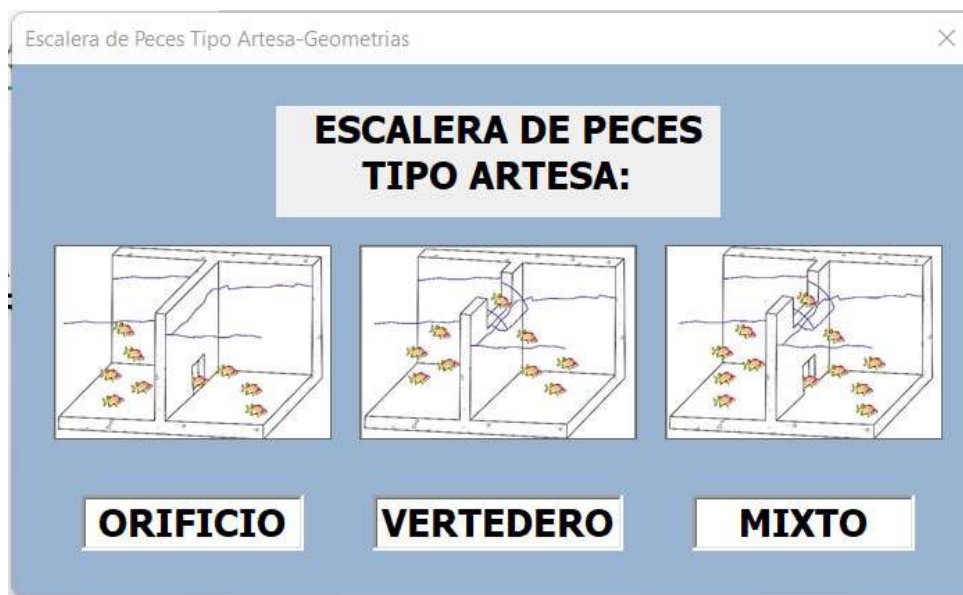
Para la creación de la interfaz en macros de Excel, primero se requiere activar el programador del Excel. Luego se genera una portada donde se encuentra el botón de "ingreso", el cual permite entrar a los diferentes formularios de la herramienta.



**Figura N° 29:** Portada de la herramienta computacional

**Fuente:** autoría.

El botón "ingreso" dirige a la pestaña "Escalera de peces tipo artesa" donde se encuentran las diferentes geometrías de la escalera de peces diseñada, al presionar el botón de la estructura que se desea analizar, se abre el formulario que le corresponda.



**Figura N° 30:** Portada de los tipos de escaleras diseñadas

**Fuente:** autoría.

En la interfaz del formulario se introducen los datos para el diseño de la escalera de peces, además se encuentra información como ábacos, tablas y recomendaciones que se requieren para el dimensionamiento de la escalera.

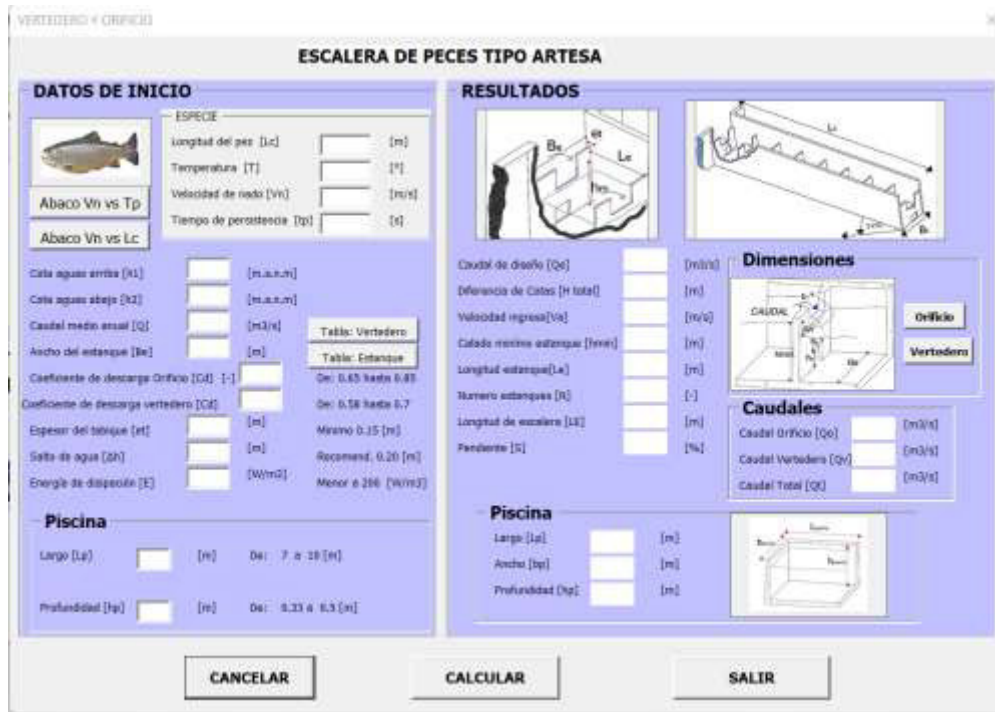


Figura N° 31: Interfaz de la escalera de peces con orificio

Fuente: autoría.

## 2.2.4. Proceso de codificación para el diseño de la herramienta:

### 2.2.4.1. Datos de las especies:

**La longitud del pez** se encuentra en el apartado 1.4.6. donde se observa la clasificación del tamaño del pez según la especie, estos valores son los recomendados para la escalera de peces tipo artesa. La **temperatura del agua** varía según la región y época del año, en el subcapítulo 1.4.8.2. se muestran las recomendaciones de la temperatura del agua que circula por la escalera. Teniendo esos dos parámetros, se encuentra la velocidad de natación y tiempo de permanencia en los ábacos del apartado 1.4.6.2. Figura N° 16 y Figura N° 17. En la Figura N° 32, se muestra el lugar donde se deben introducir los datos para continuar con los cálculos del dimensionamiento de la escalera en la herramienta.

**Figura N° 32 :** Datos iniciales de la especie con sus respectivos ábacos.

**Fuente:** autoría

**2.2.4.2. Datos de diseño:**

Las **cotas escalera de peces**, aguas arriba y aguas debajo de la obstrucción son necesarias para determinar el desnivel total que existe entre la entra y salida del dispositivo de paso, para ello se utiliza la Ecuación N° 12 del apartado 1.4.9.2.

Otro valor que se debe tener en cuenta es el **caudal medio anual**, este valor se obtiene según las condiciones hidrológicas de la zona en estudio especificado en el apartado 1.4.9.1. y se debe colocar en m<sup>3</sup>/s como se muestra en la Figura N° 33.

**Figura N° 33:** Casillas para introducir datos de cotas y caudal

**Fuente:** autoría

El valor del **espesor del tabique** no debe ser menor a 0.15m, como se especifica en el apartado 1.4.9.7.4. de igual manera, se encuentra sugerido como valor mínimo en el lado derecho de la casilla que le corresponde, ver **Figura N° 34**.

**Figura N° 34:** Casillas para introducir el espesor del dique

**Fuente:** autoría

El **ancho del estanque** se recomienda tomar de la Tabla N° 3 que se muestra en el apartado 1.4.9.7.1, en el formulario se encuentra un botón que al presionarlo aparece una tabla donde se encuentran las recomendaciones de los anchos del estanque según la longitud del pez que transite por la misma. Ver Figura N° 35

Ancho del estanque [Be]	<input type="text"/>	[m]	Tabla: Estanque
Coefficiente de descarga Orificio [Cd] [-]	<input type="text"/>		De: 0.65 hasta 0.85
Coefficiente de descarga vertedero [Cd]	<input type="text"/>		De: 0.58 hasta 0.7

**Figura N° 35:** Casilla del ancho del estanque y el coeficiente de descarga

**Fuente:** autoría

El **coeficiente de descarga para orificios y vertederos** rectangulares se toma, como se recomienda en el apartado 1.4.9.1.2 y 1.4.9.1.3. respectivamente. ver Figura N° 35. El coeficiente de descarga cambia dependiendo de la estructura hidráulica con la que se analice el diseño de la escalera de peces, por ello en cada formulario se encuentran las recomendaciones del coeficiente de descarga que se usara, según el caso

El **salto de agua** se obtiene aplicando la Ecuación N° 14 del apartado 1.4.9.4. pero según recomendaciones descritas en el marco teórico, para este tipo de escalera de peces, no debe ser menor a 0.2 m.

Salto de agua [ $\Delta h$ ]	<input type="text"/>	[m]	Recomend. 0.20 [m]
Energía de disipación [E]	<input type="text"/>	[W/m <sup>3</sup> ]	Menor a 200 [W/m <sup>3</sup> ]

**Figura N° 36:** Casillas para introducir valores del salto de agua y energía de disipación.

**Fuente:** autoría

**La energía de disipación** no debe ser mayor a 200 W/m<sup>3</sup>, como se muestra en el apartado 1.4.9.7.3. donde se encuentran recomendaciones de la energía disipada según la especie. De igual manera en la parte derecha de la casilla se encuentra la recomendación mencionada, ver Figura N° 36 .

Las recomendaciones para **la longitud de la piscina** se encuentran en el apartado 1.4.9.9.1. donde se menciona que es de 7 a 10 veces la diferencia de cotas en la entrada y salida de la escalera de peces, Ecuación N° 29. Se escoge entre el rango mencionado y se coloca en la casilla  $L_p$ , como se muestra en la Figura N° 37

The image shows a software window titled "Piscina" with a light blue background. It contains two input fields. The first is labeled "Largo [Lp]" with a small white text box and "[m]" to its right. To the right of this field is the text "De: 7 a 10 [m]". The second input field is labeled "Profundidad [hp]" with a small white text box and "[m]" to its right. To the right of this field is the text "De: 0.33 a 0.5 [m]".

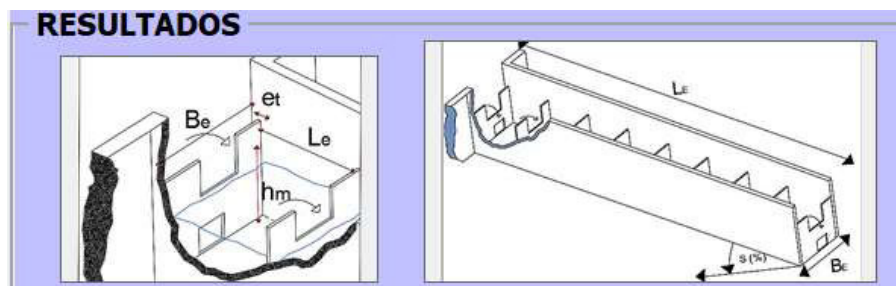
**Figura N° 37:** Casillas para introducir los datos necesarios para el dimensionamiento de la piscina de acceso.

**Fuente:** Autoría

La **profundidad de la piscina** a la entrada es  $1/3$  a  $1/2$  de la diferencia de cotas de entrada y salida de la escalera de peces como se muestra en la Ecuación N° 31 del apartado 1.4.9.9.3. de igual manera en la Figura N° 37, en la parte derecha se encuentra la recomendación del rango mencionado.

#### 2.2.4.3. Datos resultantes:

A continuación, se encuentran los resultados para el dimensionamiento de la escalera de peces tipo artesa, en la Figura N° 38 se puede observar imágenes de la estructura de paso, con sus respectivas partes.



**Figura N° 38:** Imágenes con dimensiones de la escalera de peces

**Fuente:** Autoría

#### 2.2.4.3.1. Cálculos generales:

El cálculo del **caudal de diseño** se obtiene aplicando la Ecuación N° 1 que se encuentra descrita en el apartado 1.4.9.1.1, donde se menciona que es el 10% del caudal medio anual. El valor se obtiene de manera automática en la interfaz del formulario, ubicada en la casilla de color blanco mostrada en la Figura N° 39.

Caudal de diseño [Qe]	<input type="text"/>	[m <sup>3</sup> /s]
Diferencia de Cotas [H total]	<input type="text"/>	[m]

**Figura N° 39:** Casillas del caudal de diseño y la diferencia de cotas de entra y salida

**Fuente:** Autoría

La **diferencia de cotas** de entrada y salida de la escalera de peces se ubica en la casilla inferior como se muestra en la Figura N° 39, para ello se hace uso de la Ecuación N° 12 que se encuentra en el apartado 1.4.9.2.

#### 2.2.4.3.2. Cálculos para el dimensionamiento del estanque:

**Calado mínimo del estanque ( $h_{min}$ ):** Se obtiene aplicando la Ecuación N° 22, para ello se debe obtener primero la profundidad de agua hasta el sustrato con la Ecuación N° 23 que se encuentra en el apartado 1.4.9.7.2. ver Figura N° 40.

Calado mínimo estanque [ $h_{min}$ ]	<input type="text"/>	[m]
--------------------------------------	----------------------	-----

**Figura N° 40:** Calado mínimo del estanque

**Fuente:** Autoría

**Longitud del depósito ( $Le$ ):** Se aplica la Ecuación N° 24 que se muestra en el apartado 1.4.9.7.3. donde se menciona que como recomendación se puede verificar que la dimensión se encuentra dentro de los parámetros observando la Tabla N° 3. En la Figura N° 41 se puede observar la ubicación de la solución.



Longitud estanque[Le]  [m]

**Figura N° 41:** Longitud total del estanque

**Fuente:** Autoría

**Numero de estanques (N):** Determinar el número depende de la Ecuación N° 13, este valor se encuentra en base a la diferencia de cotas y al salto de agua, esta se encuentra ubicada en el apartado 1.4.9.3. Ver Figura N° 42.

Numero estanques [N]  [-]

**Figura N° 42:** Numero de estanques a lo largo de la escalera de peces

**Fuente:** autoría

#### 2.2.4.3.3. Cálculos para el dimensionamiento de la escalera de peces

**Longitud de la escalera ( $L_E$ ):** En el apartado 1.4.9.8.2. se encuentra descrita la Ecuación N° 26 que se usa para determinar el valor total de la escalera de peces, este valor se refleja en el cuadro blanco de la Figura N° 43.

Longitud de escalera [LE]  [m]

**Figura N° 43:** Longitud total de la escalera de peces tipo artesa

**Fuente:** autoría

**Velocidad de entrada ( $V_a$ ):** en la Figura N° 44 se muestra el resultado de la Ecuación N° 27 que se encuentra en el apartado 1.4.9.8.3. donde se menciona una restricción para la velocidad, siendo la mínima de 0.8 m/s y máximo de 2 m/s, para este tipo de escalera.

Velocidad ingreso[ $V_a$ ]  [m/s]

**Figura N° 44:** Velocidad inicial con la que ingresa el caudal a la escalera de peces

**Fuente:** autoría

**Pendiente de la escalera (S):** La pendiente de la escalera de peces varía según las cotas en las que se encuentre, este depende principalmente de la topografía del terreno, en el apartado 1.4.9.8.1. se encuentra la Ecuación N° 25 que se hace uso para la estimación del valor ubicado en Figura N° 45.

Pendiente [S]	<input type="text"/>	[%]
---------------	----------------------	-----

**Figura N° 45:** Pendiente de la escalera de peces

**Fuente:** autoría

**Distancia recorrida por el pez:** es importante determinar el valor de la distancia que recorre el pez ya que se debe cumplir que sea mayor a la longitud del pez, caso contrario se debe redimensionar, como se menciona en el apartado 1.4.9.8.4, donde también se encuentra la Ecuación N° 25 que se utiliza para su estimación. Ver Figura N° 46

Longitud recorrida del pez [Dr]	<input type="text"/>	[m]
---------------------------------	----------------------	-----

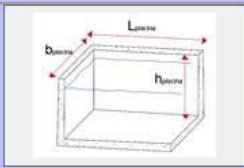
**Figura N° 46:** Longitud recorrida del pez

**Fuente:** autoría

#### 2.2.4.3.4. Calculo para el dimensionamiento de las piscinas de entrada y salida

Para obtener el dimensionamiento de las piscinas de entrada y salida se considera la diferencia de cotas del terreno y las recomendaciones mencionadas en el apartado 1.4.9.9. en la Figura N° 47 se muestra la ubicación de los valores y una imagen que hace referencias a las partes de la piscina con la nomenclatura correspondiente.

Piscina		
Largo [Lp]	<input type="text"/>	[m]
Ancho [bp]	<input type="text"/>	[m]
Profundidad [hp]	<input type="text"/>	[m]



**Figura N° 47:** Dimensionamiento de la piscina de peces

**Fuente:** autoría

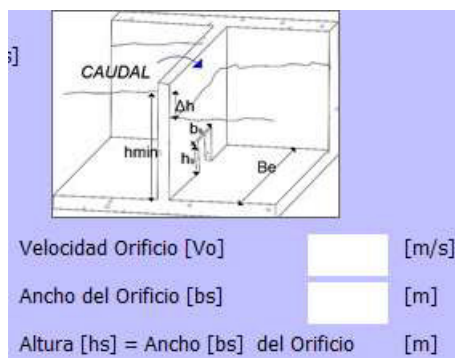
**Longitud de la piscina ( $L_p$ ).** En la Ecuación N° 29 que se encuentra en el apartado 1.4.9.9.1. se puede observar que la longitud de la piscina está relacionada directamente con la diferencia de cotas de entrada y salida.

**Ancho de la piscina ( $bp$ ).** Para obtener el valor del ancho de la piscina se hace uso de la Ecuación N° 30 donde se considera el ancho del estanque ver apartado 1.4.9.9.2.

**Profundidad de la piscina a la entrada ( $hp$ ):** en el apartado 1.4.9.9.3. menciona que su profundidad no debe ser menor a 1m ya que esto puede causar lesiones en los peces, además en la Ecuación N° 31 se muestra la fórmula para determinar la profundidad.

#### 2.2.4.3.5. Cálculos para el dimensionamiento de la estructura – orificio rectangular.

El Caudal a través del orificio, según la bibliografía, se obtiene con la Ecuación N° 2, este valor se encuentra incluido en las ecuaciones del código de manera directa. En la Figura N° 48 se puede apreciar un gráfico en donde se encuentran ubicadas las partes de la estructura con su nomenclatura correspondiente.



**Figura N° 48:** Dimensionamiento del orificio rectangular

**Fuente:** autoría

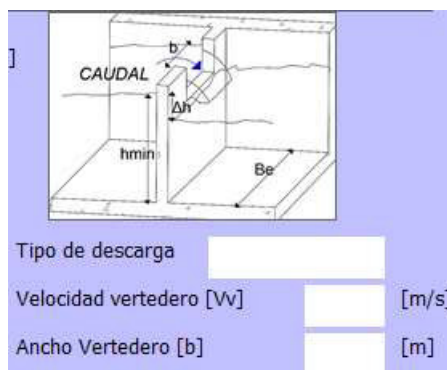
La **velocidad en el orificio** se obtiene aplicando la Ecuación N° 16 que se muestra en el apartado 1.4.9.5.3. donde se requiere las dimensiones del orificio, es decir el ancho y la altura.

**Altura y base del orificio** se determinan con la Ecuación N° 15, se despeja el área y se considera que el orificio es cuadrado teniendo la altura y la base de igual dimensión como se muestra en el apartado 1.4.9.5.4.

#### 2.2.4.3.6. Cálculos para el dimensionamiento de la estructura – vertedero rectangular.

Para el diseño de la escalera de peces tipo artesa con vertedero se tiene los mismos datos de diseño iniciales mostrados en el subcapítulo 2.2.4.1 al 2.2.4.3.4, con excepción del coeficiente de descarga ( $C_d$ ), este valor se encuentra definido en el apartado 1.4.9.1.3. depende del espesor de pared con el que se diseñó.

**Caudal a través del vertedero** El caudal del vertedero depende del espesor de la pared, si cumple con la recomendación de la Ecuación N° 5, entonces se trata de un vertedero sumergido y se debe usar la Ecuación N° 3, donde  $K$  es un factor que se obtiene con la Ecuación N° 4, en caso de no encontrarse dentro de los parámetros de la Ecuación N° 5, se utiliza la Ecuación N° 6 para descarga a superficie libre, esta información se encuentra en el subcapítulo del apartado 1.4.9.1.3.



**Figura N° 49** Dimensionamiento de la escalera de peces con vertedero.

**Fuente:** autoría

**Ancho del vertedero**, depende del tipo de descarga que tenga la estructura, si tiene una descarga libre, entonces el ancho del vertedero es el mismo que el ancho de la escalera de peces como se muestra en la Ecuación N° 19, esto se explica en el apartado 1.4.9.6.3.

si la descarga es sumergida, el ancho mínimo del vertedero no debe ser menor a 0.15m, Ecuación N° 18 y recomienda diferentes anchos según la especie de pez que se elija.

**Altura del umbral del vertedero**, se encuentra en los intervalos de 0.6 a 1 m, esto se aprecia en el subcapítulo 1.4.9.6.4. Todos los valores y recomendaciones mencionadas para el diseño de la escalera de peces con vertedero se encuentran resumidas en la Tabla N° 2.

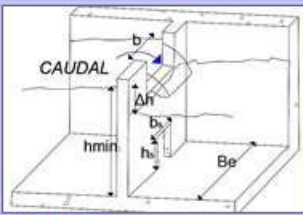
**Velocidad en el vertedero** se obtiene aplicando la Ecuación N° 16, esta ecuación es el despeje de la ecuación de continuidad, donde velocidad es igual al caudal sobre el área.

**Criterios de verificación:** para verificar el correcto dimensionamiento del vertedero en la escalera de peces tipo artesa, se aplica la Ecuación N° 20 expresadas en el apartado 1.4.9.6.6. en caso de no cumplir con los rangos establecidos, se debe rediseñar.

#### 2.2.4.3.7. Cálculos para el dimensionamiento de la estructura vertedero y orificio rectangular.

El dimensionamiento de la estructura con vertedero y orificio se realiza de la misma manera ya explicada en los apartados 2.2.4.3.5 y 2.2.4.3.6., tomando todos los criterios de diseños mencionados. En este modelo se distribuye el caudal que atraviesa por la escalera, por lo tanto, el caudal para la estructura mixta se obtiene aplicando la **Ecuación N° 11**.

### Dimensiones



### Caudales

Caudal Orificio [Qo]	<input type="text"/>	[m3/s]
Caudal Vertedero [Qv]	<input type="text"/>	[m3/s]
Caudal Total [Qt]	<input type="text"/>	[m3/s]

### Orificio

Velocidad Orificio [Vo]	<input type="text"/>	[m/s]
Ancho del Orificio [bs]	<input type="text"/>	[m]
Altura [hs] = Ancho [bs] del Orificio		

### Vertedero

Tipo de descarga	<input type="text"/>	
Velocidad vertedero [Vv]	<input type="text"/>	[m/s]
Ancho Vertedero [b]	<input type="text"/>	[m]

**Figura N° 50:** Dimensionamiento de la escalera de peces con vertedero.

**Fuente:** autoría

### 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación, se muestran los resultados del ejemplo práctico para el dimensionamiento de la escalera de peces tipo artesa con orificio rectangular, vertedero rectangular y estructura mixta, usando la herramienta computacional en macros de Excel.

Para facilitar el uso de la herramienta computacional, se realizó un manual de uso y un video tutorial, cuyo enlace se encuentra en el apartado 3.4 en el dónde se explica, con un ejemplo práctico, cómo utilizar la herramienta y finalmente en el apartado 3.5. se tiene el enlace de la herramienta, la cual se debe descargar para ejecutar el código y ser utilizada.


#### 3.1. Ejemplo práctico

Se utilizó los datos del ejemplo de cálculo de la tesis “Base de diseño de escalera para peces” de Hugo Tapia, donde los valores que varían son el coeficiente de descarga y parámetros que se mencionan en cada modelo, los datos generales que comparten los tres diseños (Orificio, Vertedero y Mixto) son los siguientes:

##### 3.1.1. Datos de la especie:

- Longitud del pez, se obtiene de un estudio de ictiológico, las dimensiones de los peces varían según la especie y la zona en donde transita, en la Tabla N° 3 se muestran las dimensiones según las especies que transitan en la escalera de peces tipo artesa.
- La temperatura del agua depende de la región y época del año como se menciona en el apartado 1.6.2. Para este ejemplo de cálculo, la temperatura es de 18° C.

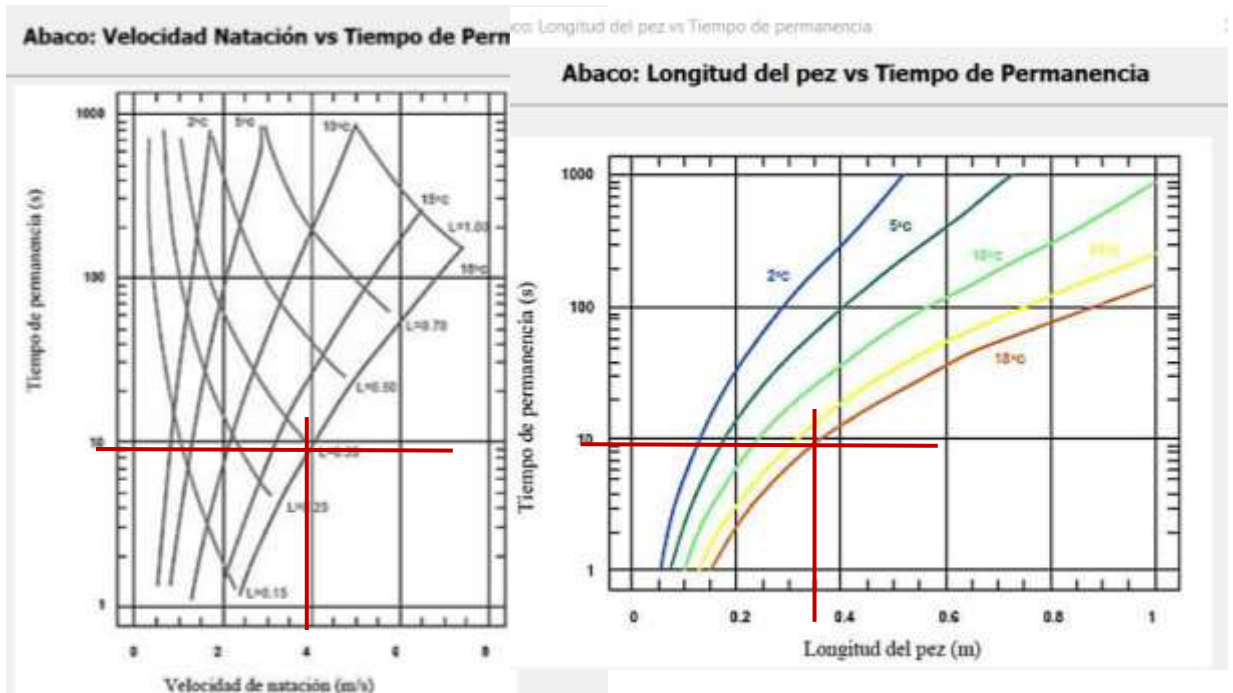
La velocidad de nado y el tiempo de permanencia se encuentra con ayuda de los ábacos ubicados en los botones “Abaco Vn vs Tp” y “Abaco Vn vs Lp”. En la Figura N° 52 se muestra cómo se obtiene la velocidad de nado y el tiempo de permeancia en los ábacos, valores que son ingresados en las casillas mostradas en la Figura N° 51.



DATOS DE INICIO	
	ESPECIE
Abaco Vn vs Tp	Longitud del pez [Lc] 0,35 [m]
Abaco Vn vs Lc	Temperatura [T] 18 [°C]
	Velocidad de nado [Vn] 3,9 [m/s]
	Tiempo de persistencia [tp] 9 [s]

Figura N° 51: Datos de la especie y sus respectivos ábacos

Fuente: autoría



**Figura N° 52:** Ejemplo para encontrar el Tp y Vn

**Fuente:** Autoría

### 3.1.2. Datos de diseño

Cota aguas arriba [h1]	2100	[m.s.n.m]	
Cota aguas abajo [h2]	2098	[m.s.n.m]	
Caudal medio anual [Q]	2.5	[m <sup>3</sup> /s]	Tabla: Vertedero
Ancho del estanque [Be]	1.6	[m]	Tabla: Estanque
Coefficiente de descarga Orificio [Cdo]	0.75	[-]	De: 0.65 hasta 0.85
Coefficiente de descarga vertedero [Cdv]	0.62	[-]	De: 0.58 hasta 0.7
Espesor del tabique [et]	0.15	[m]	Minimo 0.15 [m]
Salto de agua [Δh]	0.2	[m]	Recomend. 0.20 [m]
Energía de disipación [E]	180	[W/m <sup>3</sup> ]	Menor a 200 [W/m <sup>3</sup> ]

**Figura N° 53:** Datos de diseño

**Fuente:** Autoría

Los datos de diseño que se introdujeron en la Figura N° 53, son las cotas de nivel, valores que se obtienen a partir de un estudio topográfico del lugar en donde se realizará la escalera de peces, para el ejemplo práctico de la tesis [3], los valores son; aguas arriba: 2100 msnm y aguas abajo: 2098 msnm.

El caudal medio anual, se determina a partir de un estudio hidrológico, el valor que se utilizara en este ejemplo práctico es de 2.5 m<sup>3</sup>/s.

El ancho del estanque se obtiene de las recomendaciones mostradas en el botón "Tabla: Estanque" como se muestra en la Figura N° 53, para ello se utiliza el tamaño del pez igual a 0.35 m, por lo tanto, el ancho del estanque está en el rango de 1.6 a 2 m. Para este ejemplo se utilizó el valor de 1.6m.

Recomendaciones: Dimensiones del Estanque

ESTANQUES				
TAMAÑO DEL PEZ	Dimensiones del estanque (m)			Caudal max en la escalera de peces tipo artesa
	Longitud (Le)	Ancho (Be)	Profundidad (Y)	
Mayor a 0.7	5 - 6	2.5 - 3	1.5 - 2	2.5
0.7 - 0.3	2.5 - 3	1.6 - 2	0.8 - 1.0	0.2 - 0.5
0.3 - 0.15	1.4 - 2	1.0 - 1.5	0.6 - 0.8	0.08 - 0.2
Menor a 0.15	> 1.0	> 0.8	> 0.6	0.05 - 0.1

**Figura N° 54:** Tabla para dimensionamiento del estanque

**Fuente:** Autoría

Los coeficientes de descarga dependen de la estructura, se escoge un valor de 0.62 para vertedero, este valor varía dependiendo el tipo de descarga que se de en el vertedero, como se menciona en el apartado 1.4.9.1.3. y para orificio, se selecciona el valor de 0.75 mencionado en el apartado 1.4.9.1.2, por lo tanto, el coeficiente de descarga debe estar dentro de los rangos recomendados en la parte derecha de la Figura N° 53. Para el espesor del tabique se colocó 0.15 m, el valor mínimo recomendado que depende del espesor de la pared, el cual varía según el material de la escalera de peces.

El salto del agua y la energía de disipación depende del tamaño del pez, mientras más grande es su tamaño, mayor será su salto y la energía de disipación que resistirá. El valor mínimo del salto de agua, recomendado para esta escalera es de 0.2 m y la energía de disipación tomada es de 180 W/m<sup>3</sup>, según las recomendaciones del apartado 1.4.9.7.3.

En las casillas de la Figura N° 55 se ingresa la constante para el dimensionamiento de la piscina, se elige el valor que se encuentre dentro el rango recomendado en la parte derecha, mientras mayor sea su coeficiente, mayor serán las dimensiones de la piscina.

**Piscina**

Largo (Lp)  (m) De: 7 a 10 (m)

Profundidad (hp)  (m) De: 0.33 a 0.5 (m)

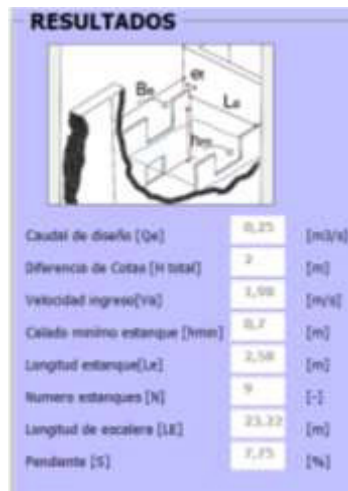
**Figura N° 55:** Dimensionamiento de la piscina para escalera de peces tipo artesa

**Fuente:** Autoría



### 3.1.3. Datos resultantes:

Los resultados obtenidos en la Figura N° 56, ayudan al dimensionamiento de los estanques y de la escalera de peces.



**Figura N° 56:** Resultados para el dimensionamiento de la escalera y estanques.

**Fuente:** Autoría

El caudal ecológico es de 0.25 m<sup>3</sup>/s, valor que se calcula con la Ecuación N° 1, tomando el 10% del caudal medio anual, mientras que la diferencia de cotas es la resta entre las cotas de nivel, para ello se aplica la Ecuación N° 12.

#### 3.1.3.1. Dimensión del estanque:

Los criterios de diseño para el dimensionamiento del estanque se presentan en el apartado 1.4.9.3. donde se muestra la ecuación que se aplica para obtener el numero de estanque, considerando un salto de agua de 0.2 m y el resultado de desniveles de cota igual a 2 m.s.n.m, realizando este calculo se obtiene 9 estanques en la escalera de peces tipo artesa.

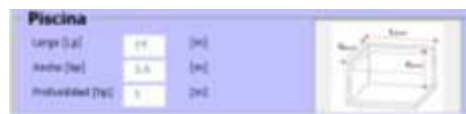
#### 3.1.3.2. Dimensión de la escalera de peces:

La pendiente de la escalera (S) da como resultado 7.75%, cumpliendo con las recomendaciones mencionadas en el apartado 1.4.9.8.1. donde menciona que no debe ser menor a 5% ni mayor a 10%.

Longitud de la escalera ( $L_E$ ) es de 23.22 m, este valor se obtiene el producto de la longitud del estanque que es 2.58 m y por 9 estanques en total. La Velocidad de entrada ( $V_a$ ) es de 1.98 m/s, este resultado debe permanecer entre los rangos de 0.8 a 2m/s y se obtiene aplicando la Ecuación N° 27.

Usando las características natatorias de la especie, se obtiene 11.5 m de distancia recorrida por el pez, cuyo valor es mayor al 2.58 m de la longitud del estanque, cumpliendo con la verificación mencionada en el apartado 1.4.9.8.4.

### 3.1.2. Dimensión de la piscina de entrada y salida

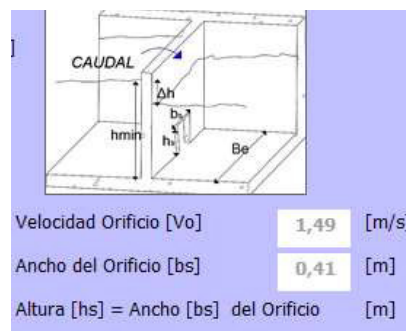


**Figura N° 57:** Resultados del dimensionamiento de la piscina

**Fuente:** Autoría

La longitud de la piscina es de 14 m y su ancho es de 2.6, mayor al ancho de los estanques, lo cual es correcto, mientras que la profundidad de la piscina a la entrada es de 1 m.

### 3.1.3. Orificio



**Figura N° 58:** Resultados para el dimensionamiento del orificio

**Fuente:** Autoría

Al ser un orificio rectangular, las dimensiones de ancho y altura son las mismas como se muestra en la Ecuación N° 15. El ancho es de 0.41 m, se utiliza la Ecuación N° 2.

La velocidad en el orificio es de 1.49 m/s, se obtiene con la Ecuación N° 16, al ser un orificio que se encuentra en el fondo del dique, la velocidad del flujo que atraviesa el orificio es menor a la velocidad de flujo que ingresa a la escalera.

### 3.1.4. Vertedero:

En la tabla para vertedero se selecciona el salto de agua según la especie ya que no siempre es el mismo valor para orificio y vertedero. Ver Figura N° 59.

Tabla para vertedero						
ESPECIE	VERTEDERO				VELOCIDAD	Cd (-)
	$\Delta h_{max}$ (m)		$b_{min}$ (m)			
	LIBRE	SUMERGIDO	LIBRE	SUMERGIDO		
SALMÓN	0.2 - 0.5	0.45 - 0.2	b=B	0.3	3.4	0.58 - 0.75
TRUCHA	0.20 - 0.45	0.3 - 0.25	b=B	0.2	3	
SABALO	0.2	0.2 - 0.3	b=B	0.45	2.4	
OTROS-PEQUEÑOS	0.2	0.15-0.25	b=B	0.45	1.7	0.62

Figura N° 59: Tabla para conocer el salto de agua según la especie.

Fuente: Autoría

Para el dimensionamiento del vertedero se toma en cuenta si la descarga es libre o sumergida.

Para conocer el tipo de descarga que tiene el vertedero se aplica la Ecuación N° 5, dando como resultado 0.7, si el valor obtenido se encuentra entre 0.5 y 0.9, la descarga es sumergida, caso contrario es descarga libre.

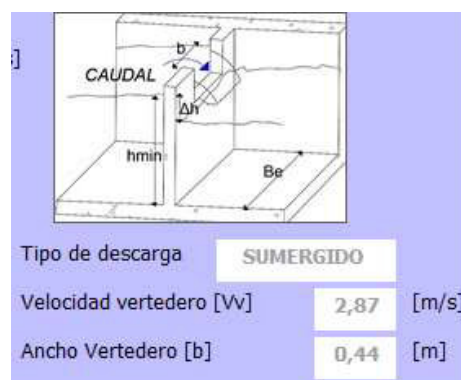


Figura N° 60: Resultados para el dimensionamiento del vertedero

Fuente: Autoría

Al tener descarga sumergida, se determina K con la Ecuación N° 4, este parámetro se encuentra dentro de la Ecuación N° 3, misma que ayuda a determinar el ancho del

vertedero, para saber si el dimensionamiento es correcto se realiza la verificación, del subcapítulo 1.4.9.6.3, es decir, si la relación entre el ancho del estanque y el ancho del vertedero se encuentran entre 4 y 6, el dimensionamiento es correcto, caso contrario se redimensiona la estructura.

La velocidad del agua que atraviesa por el vertedero y no debe ser mayor a las recomendadas en la Tabla N° 2.

### 3.1.5. Orificio y Vertedero

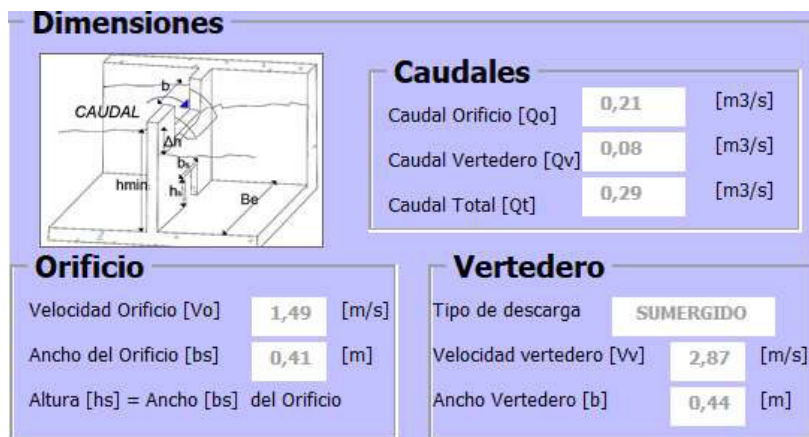


Figura N° 61: Resultado de la estructura mixta

Fuente: Autoría

El dimensionamiento del orificio y vertedero utiliza los mismos parámetros mencionadas en el subcapítulo 3.1.1, 3.1.2 y 3.1.3 pero para determinar el caudal que atraviesa por la escalera se calcula con las ecuaciones del apartado 1.4.9.1.4.

Al ser una estructura combinada, el caudal total se distribuye entre el orificio y el vertedero, el caudal que atraviesa por el orificio es de 0.21 m<sup>3</sup>/s. Y el caudal que atraviesa por el vertedero es de 0.08 m<sup>3</sup>/s, este valor es menor ya que es a descarga sumergida. El caudal total que traviesa por el tabique con vertedero y orificio es la suma de estos cuyo valor es de 0.29 m<sup>3</sup>/s, esto se determina con la Ecuación N° 11.

### 3.1.6. Resultados escalera de peces tipo artesa con orificio:

En la Figura N° 62 se observan los resultados obtenidos para el dimensionamiento de la escalera de peces tipo artesa con orificio.

Escalera de Peces Tipo Artesa con Orificio

#### ESCALERA DE PECES TIPO ARTESA

##### DATOS DE INICIO

**ESPECIE**

Longitud del pez [Lc]  [m]

Temperatura [T]  [°C]

Velocidad de nado [Vn]  [m/s]

Tiempo de persistencia [tp]  [s]

Abaco Vn vs Tp

Abaco Vn vs Lc

Cota aguas arriba [h1]  [m.s.n.m]

Cota aguas abajo [h2]  [m.s.n.m]

Caudal medio anual [Q]  [m³/s]

Ancho del estanque [Be]  [m] Tabla: Ancho

Coefficiente de descarga [Cdo]  [-] De: 0.65 hasta 0.85

Espesor del tabique [et]  [m] Mínimo 0.15 [m]

Salto de agua [Δh]  [m] Recomend. 0.20 [m]

Energía de disipación [E]  [W/m³] Menor a 200 [W/m³]

**Piscina**

Largo [lp]  [m] De: 7 a 10 [m]

Profundidad [hp]  [m] De: 0.33 a 0.5 [m]

##### RESULTADOS



Caudal de diseño [Qe]  [m³/s]

Diferencia de Cotas [H total]  [m]

Velocidad ingreso [Vo]  [m/s]

Calado máximo estanque [hmn]  [m]

Longitud estanque [Le]  [m] Velocidad Orificio [Vo]  [m/s]

Número estanques [N]  [-] Ancho del Orificio [Bo]  [m]

Longitud de escalera [LE]  [m] Altura [hs] = Ancho [bo] del Orificio:  [m]

Pendiente [S]  [%] Longitud recorrida del pez [Dr]  [m]

**Piscina**

Largo [lp]  [m]

Ancho [bp]  [m]

Profundidad [hp]  [m]



CANCELAR
CALCULAR
SALIR

**Figura N° 62:** Resultados del ejemplo práctico para dimensionamiento de la escalera de peces tipo artesa con orificio rectangular.

**Fuente:** autoría

### 3.1.7. Resultados escalera de peces tipo artesa con vertedero:

Los resultados para la escalera de peces tipo artesa con vertedero se pueden observar en la Figura N° 63.

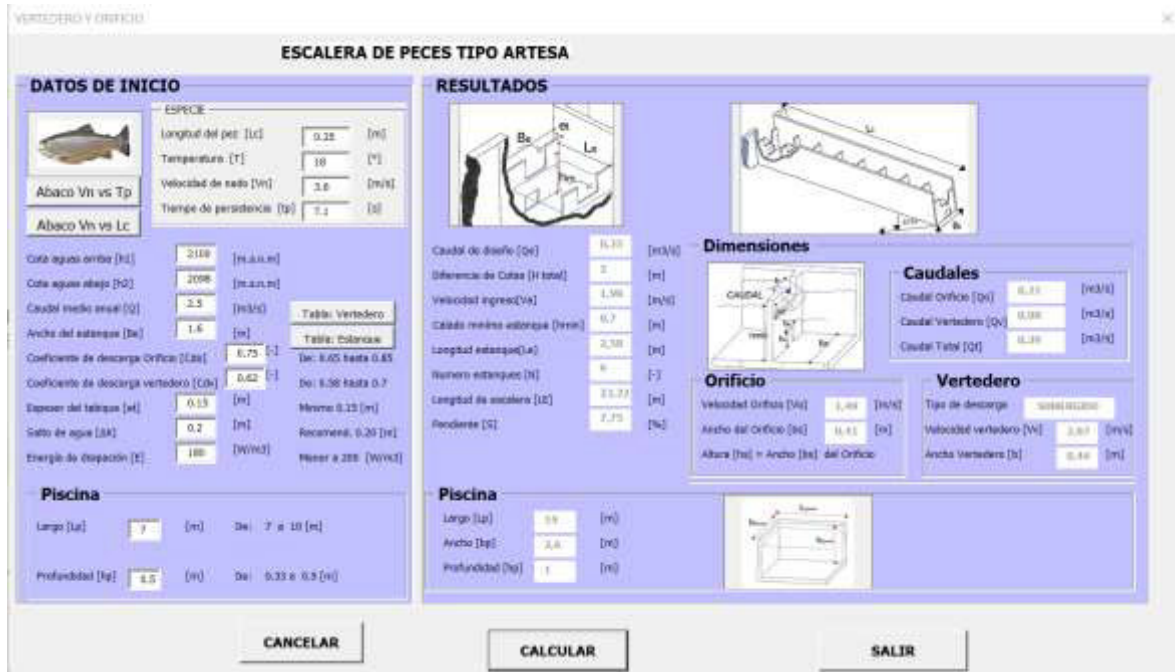


**Figura N° 63:** Resultados del ejemplo práctico para dimensionamiento de la escalera de peces tipo artesa con vertedero rectangular.

**Fuente:** autoría

### 3.1.8. Resultados escalera de peces tipo artesa con vertedero y orificio:

En la Figura N° 64 se muestran los resultados obtenidos para el dimensionamiento de la escalera de peces tipo artesa con orificio y vertedero.



**Figura N° 64:** Resultados del ejemplo práctico para dimensionamiento de la escalera de peces tipo artesa con orificio rectangular.

**Fuente:** autoría

**Nota:** En el **Anexo I** se encuentra el ejercicio desarrollado en el apartado 3.1, se explica de manera clara con ayuda de la sustitución de valores en las ecuaciones correspondientes.

## 3.2. Manual de uso:

Para el uso correcto de la herramienta computacional realizada en macros de Excel, se debe ejecutar el programa, el cual se abre automáticamente mostrando la portada de la herramienta computacional, en la misma se encuentra el botón "INGRESAR", al presionar este botón, se proyecta otra ventana con tres diferentes estructuras para diseñar la escalera de peces tipo artesana.



Figura N° 65: Imagen de la portada y tipos de estructuras

Fuente: autoría

### 3.2.1. Selección del tipo de escalera:

Al seleccionar el tipo de escalera, aparece un formulario, en el lado izquierdo se encuentran la sección de datos a ingresar con sus respectivas tablas y recomendaciones y en el lado derecho se encuentran los resultados para el dimensionamiento de la escalera de peces tipo artesana con su respectiva estructura

Cada ventana posee el siguiente botones:

- *Cancelar:* este botón permite borrar todos los valores que se encuentren escritos en el formulario
- *Calcular:* Ayuda a calcular todos los parámetros y dimensiones para el diseño de la escalera de peces
- *Salir:* Al presionar este botón, permite regresar al inicio es decir a la portada de la herramienta computacional.



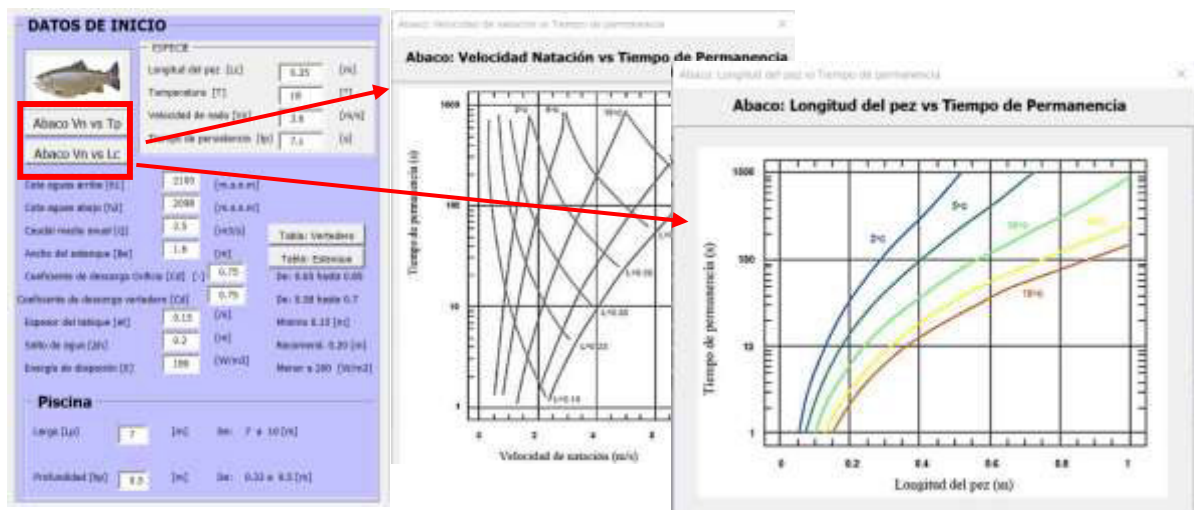
En el lado izquierdo de la **Figura N° 66** se puede visualizar los espacios en donde se ingresa la información correspondiente para el diseño.



**Figura N° 66:** Formato de la escalera de peces tipo artesa

**Fuente:** autoría

Los botones "Abaco Vn vs Tp" y "Abaco Vn vs Lc" se encuentra la información de la velocidad y tiempo de permanencia del pez, dependiendo de la temperatura del agua y longitud del pez.



**Figura N° 67:** Ubicación y uso de los ábacos.

**Fuente:** autoría

Al presionar el botón "Tabla: Ancho" que se muestra en la **Figura N° 68** se proyecta una tabla de recomendaciones, según el tamaño del pez, para el diseño del estanque de la escalera tipo artesa. (Imagen correspondiente al formulario de orificio).

TAMANO DEL PEZ	Dimensiones del estanque (m)			Caudal max en la escalera de peces tipo artesa
	Longitud (Le)	Ancho (Be)	Profundidad (Y)	
Mayor a 0.7	5-6	2.5-3	1.5-2	2.5
0.7-0.3	2.5-3	1.6-2	0.8-1.0	0.7-0.5
0.3-0.15	1.4-2	1.0-1.5	0.6-0.8	0.08-0.2
Menor a 0.15	>1.0	>0.8	>0.6	0.05-0.1

**Figura N° 68:** Ubicación de la tabla para dimensionamiento del estanque

**Fuente:** autoría

En la sección de la piscina se ingresa un valor dentro de los rangos recomendados, como se puede observar en el cuadro rojo de la Figura N° 69, en la parte de resultados se encuentra el dimensionamiento calculado a través de ecuaciones.

**RECOMENDADOS**

**OBTENIDOS**

**Figura N° 69:** Ubicación de valores para el dimensionamiento de la piscina.

**Fuente:** autoría

Los datos que se utilizan para el dimensionamiento de las estructuras como orificio y vertedero son diferentes en cada formulario, como los coeficientes y recomendaciones para el salto del agua.

### 3.2.2. Orificio

El salto de agua y el coeficiente de descarga se encuentra junto al bloque donde se ingresa el dato, cuyos valores son los recomendados para este diseño. Y en el lado derecho del cuadro de respuestas se encuentran los resultados del dimensionamiento del orificio.



Figura N° 70: Ubicación de valores para el dimensionamiento del orificio

Fuente: autoría

### 3.2.3. Vertedero:

En la **Figura N° 71** se encuentra la "Tabla: Vertedero" con recomendaciones para el dimensionamiento de la estructura, dependiendo si es a descarga libre o sumergida, y en el cuadro derecho se encuentran los resultados para el dimensionamiento de la escalera de peces con vertedero.



Figura N° 71: Ubicación de tabla de vertedero y resultado para vertedero.

Fuente: Autoría

### 3.2.4. Mixto

En los botones orificio y vertedero se encuentran las dimensiones de las estructuras, según corresponda. En la parte inferior señalada por el recuadro rojo se hallan los resultados del caudal que atraviesa por cada estructura y también su caudal total.

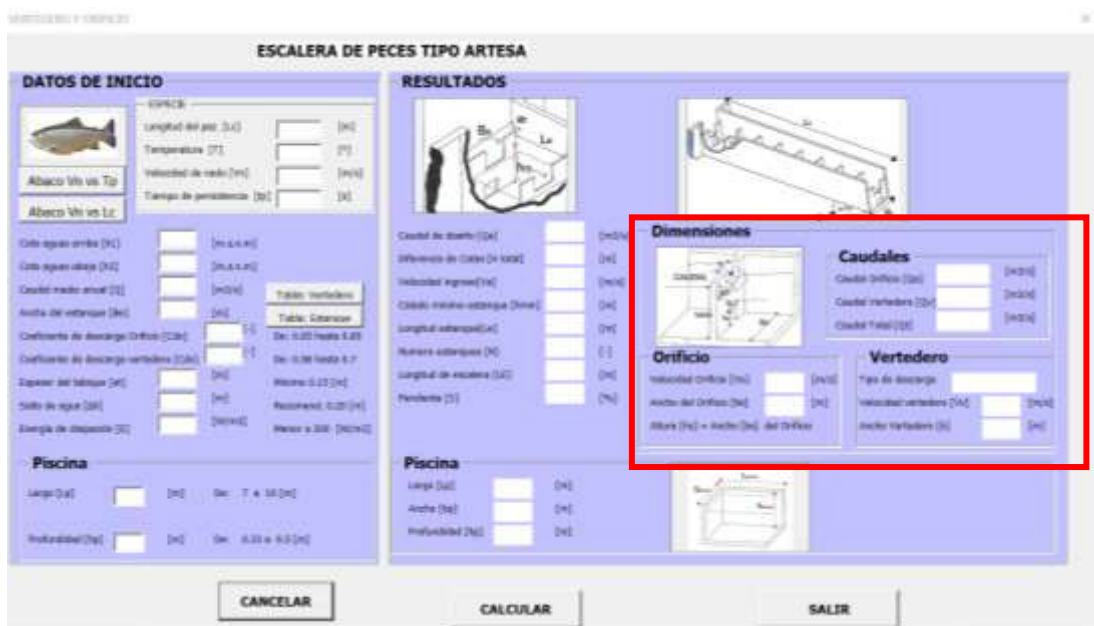


Figura N° 72: Resultado de caudales y dimensionamiento para estructura mixta.

Fuente: Autoría

### **3.3. Video tutorial para el manejo de la herramienta computacional.**

A continuación, se encuentra el enlace N° 1 para acceder al video tutorial del manejo de la herramienta computacional para el dimensionamiento de una escalera de peces tipo artesa, realizada en Macros de Excel.

**Enlace N° 1:**

<https://drive.google.com/drive/folders/1vFLCuYgfuREiPIAajh9TXX6l9rww2qi-?usp=sharing>

### **3.4. Herramienta computacional para la escalera de peces tipo artesa**

El archivo de la herramienta computacional desarrollada en macros de Excel se encuentra en el enlace N° 2.

- Para utilizar el documento, se descarga la carpeta comprimida, luego se debe descomprimir y abrir la hoja de Excel.
- Para acceder a la interfaz, se activa el programador y luego se presiona el botón ingresa, a continuación, se siguen los pasos mencionados en el manual de uso de apartado 3.3.

**Enlace N°2:**

<https://drive.google.com/file/d/1sDpdkKZ4fOOjDxIC1rgJd36YilGVaREQ/view?usp=sharing>

### **3.5. Conclusiones**

- Al construir una obra hidráulica se debe tomar en cuenta al ecosistema y su prevalencia, por ello es importante la construcción de obras como escaleras de peces, que permiten el tránsito de las especies acuáticas, disminuyendo su tasa de mortalidad y manteniendo en equilibrio al ecosistema.

- Para diseñar la escalera de peces, se considera el caudal ecológico, mismo que debe ser el 10% del caudal medio anual, para así garantizar la subsistencia de las especies acuáticas.
- Se requiere conocer las capacidades natatorias del pez para realizar un diseño efectivo de la escalera de peces, por ello es necesario un estudio que permite saber que peces se encuentran en la zona de diseño y cuáles son sus dimensiones, ya que mientras más grande sea el pez, mayor será el dimensionamiento de la estructura. Dependiendo de la especie, ubicación de la obra, caudal, topográfica y otras características, se toma el tipo de escalera efectivo para aplicar en ese sector.
- La temperatura es un factor que afecta radicalmente en las capacidades natatorias del pez, si el agua se encuentra con temperaturas frías, los peces nadan con velocidades bajas, caso contrario las velocidades incrementan, pero las especies se cansan más rápido.
- Cada pez tiene sus características de nado, mientras más grande sea el pez, mayor será su salto de agua.
- El dimensionamiento del estanque es de suma importancia, ya que en cada estanque los peces toman un tiempo de descanso, por ello no debe existir turbulencia en el agua y ni velocidades mayores a 2 m/s.
- Se debe respetar las recomendaciones del espesor del tabique, ya que este parámetro depende del material con el que se esté diseñando, al ser menor a la dimensión recomendadas, las fuerzas hidrostáticas de presiones sobre la pared empujaran a la misma y podría ocasionar colapso de los diques.
- La escalera de peces debe estar ubicada siempre paralela a la dirección del flujo, para evitar aglomeraciones de los peces o incluso que estos se pierdan y no ingresen a la estructura, por ello la ubicación más favorable es cuando se coloca la estructura lateral a la obstrucción.
- La pendiente no debe ser mayor al 10%, ya que, si esto sucede, las características hidráulicas del flujo cambian, como la velocidad, generando lesiones o incluso la perdida de vida de las especies, ya que su velocidad podría exceder a la velocidad que el pez pueda resistir.
- La tecnología ha ido evolucionando con el paso del tiempo y se han creado diferentes lenguajes y programas que ayudan a elaborar herramientas

computacionales, con el fin de facilitar los cálculos matemáticos, ahorrándonos tiempo y facilitándonos diseños.

- Con ayuda de macros en Excel se desarrolló una herramienta computacional que facilita el dimensionamiento de la escalera de peces tipo artesa, se hizo uso de todos los criterios para el dimensionamiento de la escalera, con el fin de hacerla efectiva, rápida y de fácil uso.
- La información se tomó de varios documentos, para complementar todos los requisitos necesarios para generar una herramienta que permita el dimensionamiento de la escalera de peces tipo artesa.

### **3.6. Recomendaciones**

- Ecuador posee pocas estructuras que protejan el caudal ecológico, por ello es recomendable el diseño e implementación de estructuras que permitan mantener el caudal ecológico y la calidad del agua.
- Como profesionales de la rama ingenieril, debemos estar conscientes de las afectaciones de las construcciones de obras civiles, sean hidráulicas o estructurales, siempre debe prevalecer el cuidado de los ecosistemas y del medio ambiente.
- Para implementar una estructura de paso, es recomendable conocer que especie de peces transitan en los ríos de la zona a diseñar, para conocer cuáles son los tamaños mínimos y máximo de los peces que cruzarán el dispositivo de paso.
- Se recomienda respetar los criterios de diseño para tener una estructura que funcione de manera óptima y sin necesidad de mantenimiento constante.
- Se debe evaluar las características hidráulicas e hidrológicas de la zona en donde se requiere ubicar el dispositivo, ya que las crecidas podrían destruir los dispositivos de paso.
- Se recomienda elegir correctamente el tipo de escalera de peces que se va a colocar, ya que cada tipo de dispositivo tiene sus parámetros y criterios para su óptimo funcionamiento, cada tipo de escalera tiene sus pendientes y caudales que deben ser respetados para que sean eficientes.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. S. Edwin Barrera, «Diseño y optimización de herramientas macros para el dimensionamiento de escaleras de peces,» Quito, 2021.
- [2] D. R. R. Vásquez, «Base de diseño de estructuras en discos transversales para la captación y tránsito del caudal ecológico.,» Quito, 2012.
- [3] C. T. H. Rodrigo, «Base de diseño de escalera para peces,» Quito, 2013.
- [4] A. N. Constituyente, Ley Organica de Recursos hídricos, Usos y Aprovechamientos del agua, Quito, 2014.
- [5] R. Barragán, «Estudio de Diseño hidraulico definitivo- Proyecto Hidroelectrico Pilalo III,» 2017.
- [6] E. Barrera, «Diseño y optimización de herramientas (macro) para el dimensionamiento de escaleras de peces,» Quito, 2021.
- [7] Valbuena-Castro, «Manual para la evaluación de funcionalidad de pasos para peces de estanques sucesivos.,» Valladolid, 2016.
- [8] R. D. O. Carrasco, «Proyecto de paso para peces sobre el azud del puente del ferrocarril de Burgos,» Universidad de Valladolid, Palencia, 2016.
- [9] G. T. y. J. H. Harris, «Fish Passage y Fishways en Nueva Gales del Sur,» Nueva Gales del Sur- SIDNEY, 2000.
- [10] A. Martínez de Azagra Paredes, «Diseño de escalas para peces,» Universidad de Valladolid , 1999.
- [11] F. J. B. Córdoba, «EVALUACIÓN BIOLÓGICA DE ESCALAS DE ARTESAS PARA ALGUNAS DE LAS PRINCIPALES ESPECIES DE PECES IBÉRICOS,» Universidad de Valladolid, Palencia, 2016.
- [12] L. Carvajal, Metodología de la Investigación Científica. Curso general y aplicado, 28 ed., Santiago de Cali: U.S.C., 2006, p. 139.
- [13] P. J. Prado, Guia de peces para aguas continentales en la vertiente occidental del Ecuador, Quito, 2015.
- [14] J. A. L. López, Desarrollo de una herramienta en VBA de Excel, Mexico, D.F, 2013.



## 5 ANEXOS

### 5.1. Anexo I: Ejemplo de cálculo con Ecuaciones

Para verificar el buen funcionamiento de la herramienta computacional generada, se utilizó los datos del ejemplo de cálculo de la tesis [2], los tres diseños son los siguientes:

- Longitud del pez: 3.5 m
- La temperatura del agua: 18° C.
- El caudal medio anual: 2.5 m<sup>3</sup>/s.
- Niveles de cota:
  - Aguas arriba: 2100 msnm.
  - Aguas abajo: 2098 msnm.

Con ayuda de los ábacos de la Figura N° 16 y la Figura N° 17 se obtiene la velocidad de nado y el tiempo de permanencia.

**Caudal ecológico:** El caudal ecológico se calcula con la Ecuación N° 1, tomando el 10% del caudal medio anual.

$$Q_e = 10 \% * Q_m$$

$$Q_e = 10 \% * 2.5$$

$$Q_e = 0.25 \frac{m^3}{s}$$

#### DIMENSIÓN DEL ESTANQUE:

**Desnivel de cotas** o altura total (H<sub>TOTAL</sub>) se obtiene aplicando la Ecuación N° 12.

$$H_{TOTAL} = h_1 - h_2$$

$$H_{TOTAL} = 2100 - 2098$$

$$H_{TOTAL} = 2 \text{ msnm}$$

El **Numero de estanques (N)** se determina con la relación entre los desniveles y salto de agua, aplicando la Ecuación N° 13

$$N^\circ = \frac{H_{TOTAL}}{\Delta h} - 1$$

$$N^\circ = \frac{2}{0.2} - 1$$

$$N^\circ = 9$$

**Ancho del estanque (Be):** El ancho Be Tabla N° 3 anchos recomendados según el tamaño del pez, Donde Be = 1.6m

**Calado mínimo del estanque:** Para el calado mínimo se utiliza la **Ecuación N° 22** donde delta h es 0.2, valor recomendado para orificio.

$$h_{min} = h + \frac{\Delta H}{2}$$

La variable h se obtiene con la **Ecuación N° 23**

$$h = Lc + 0.25$$

$$h = 0.35 + 0.25$$

$$h = 0.6 \text{ m}$$

$$h_{min} = 0.6 + \frac{0.2}{2}$$

$$h_{min} = 0.7 \text{ m}$$

**Longitud del depósito (Le):** Se obtiene a partir de la Ecuación N° 24 y en la Tabla N° 3, de donde se escogen parámetros para el Be.

$$L_e = \frac{\rho * g * \Delta h * Q}{B_e * h_{min} * E} + e_t$$

$$L_e = \frac{1000 * 9.81 * 0.2 * 0.25}{1.6 * 0.7 * 180} + 0.15$$

$$L_e = 2.58 \text{ m}$$

**Espesor de las paredes o diques (et):** El espesor de las paredes depende del bloque de construcción, se recomienda usar el valor de 0.15 m, apartado 1.4.9.7.4.

#### **DIMENSIÓN DE LA ESCALERA DE PECES:**

**Pendiente media de la escalera (S)** se determina con la Ecuación N° 25, donde se recomienda que la pendiente no sea mayor al 10%

$$S = \frac{\Delta h}{L_e}$$

$$S = \frac{0.2}{2.58}$$

$$S = 7.75 \%$$

**Longitud de la escalera ( $L_E$ ):** Es la suma de la longitud del estanque por el número de estanques, haciendo uso de la Ecuación N° 26

$$L_E = L_e * N^\circ$$

$$L_E = 2.58 * 9$$

$$L_E = 23.22 \text{ m}$$

**Velocidad de entrada ( $V_a$ ):** La velocidad debe permanecer entre los rangos de 0.8 a 2m/s, usando la Ecuación N° 27.

$$V_a < \sqrt{2g\Delta h}$$

$$V_a < \sqrt{2 * 9.81 * 0.2}$$

$$V_a < 1.98 \text{ m/s}$$

**Distancia recorrida por el pez ( $D_r$ ):** Se obtiene aplicando la Ecuación N° 28 y no debe ser menos que la longitud del estanque, en este cálculo se utiliza las características de nado del pez.

$$D_r = (V_n - V_a) * t_p$$

$$D_r = (3.6 - 1.98) * 7.5$$

$$D_r = 11.5 \text{ m}$$

$$D_r > L_e$$

$$11.5 > 2.58$$

Ok

## **DIMENSIÓN DE LA PISCINA DE ENTRADA Y SALIDA**

**Longitud de la piscina:** Aplicando la Ecuación N° 29 se obtiene el largo de la piscina de entrada y salida de la escalera de peces tipo artesa.

$$L_{piscina} = 7 \text{ o } 10 * H_{TOTAL}$$

$$L_{piscina} = 7 * 2$$

$$L_{piscina} = 14 \text{ m}$$

**Ancho de la piscina:** Con la Ecuación N° 30 se calcula el ancho de la piscina de entrada y salida de la escalera de peces tipo artesa.

$$b_{piscina} = B_e + 1$$

$$b_{piscina} = 1.6 + 1$$

$$b_{piscina} = 2.6 \text{ m}$$

**Profundidad de la piscina a la entrada:** La profundidad de la piscina de entrada se obtiene con la Ecuación N° 31, misma que está relacionada con la altura total de desniveles de cotas.

$$h_{piscina} = \frac{1}{3} \text{ o } \frac{1}{2} * H_{TOTAL}$$

$$h_{piscina} = 0.5 * 2$$

$$h_{piscina} = 1 \text{ m}$$

## **ORIFICIO**

**Dimensión del orificio:** Para obtener las dimensiones del orificio se despeja  $A_s$  de la Ecuación N° 2 y se toma en cuenta el coeficiente de descarga ( $C_d = 0.65 - 0.85$ ).

$$Q_o = c_d * A_s * \sqrt{2g\Delta h}$$

$$0.25 = 0.7 * A_s * \sqrt{2 * 9.81 * 0.2}$$

$$A_s = 0.180 \text{ m}^2$$

Con el valor del área del orificio se obtiene la **altura y base del orificio** como se muestra en el apartado en 1.7.5.2. donde aplicando la Ecuación N° 15 se tiene lo siguiente.

$$A_s = h_s * b_s$$

$$A_s = (b_s)^2$$

$$h_s = b_s$$

$$b_s = \sqrt{A_s}$$

$$b_s = \sqrt{0.180}$$

$$b_s = 0.41 \text{ m} = h_s$$

**Velocidad en el orificio:** La Ecuación N° 16 muestra cómo se debe obtener la velocidad del flujo a través del orificio.

$$V_o = \frac{Q_o}{A_s}$$

$$V_o = \frac{0.25}{0.180}$$

$$V_o = 1.39 \text{ m/s}$$

#### **VERTEDERO:**

Para el dimensionamiento del vertedero se debe tomar en cuenta si el vertedero tiene descarga libre o sumergida, además debe cumplir los criterios de verificación señalados en el apartado 1.4.9.6.

**Tipo de descarga:** Para conocer el tipo de descarga que tiene el vertedero la Ecuación N° 5, si el valor obtenido se encuentra entre 0.5 y 0.9, la descarga es sumergida.

$$0.5 \leq \left( \frac{h - \Delta H}{h} \right) \geq 0.9$$

$$0.5 \leq \left( \frac{0.7 - 0.2}{0.7} \right) \geq 0.9$$

$$0.5 \leq (0.71) \geq 0.9$$

*Descarga sumergida.*

Al tener descarga sumergida, se determina K con la Ecuación N° 4.

$$k = \left[ 1 - \left( \frac{h - \Delta H}{h} \right)^{1.5} \right]^{0.385}$$

$$k = \left[ 1 - \left( \frac{0.7 - 0.2}{0.7} \right)^{1.5} \right]^{0.385}$$

$$k = 0.7$$

**Dimensión del vertedero:** Para obtener el ancho del vertedero se aplica la Ecuación N° 3, donde se despeja la constante b, debe cumplir con los criterios mencionados en el subcapítulo 1.4.9.6.3.

$$Q = \frac{2}{3} * k * cd * b * \sqrt{2g * \Delta h}$$

$$0.25 = \frac{2}{3} * 0.7 * 0.62 * b * \sqrt{2 * 9.81 * 0.2}$$

$$b = 0.436 \text{ m}$$

**Verificación:**

Para saber si el dimensionamiento del vertedero es correcto se utiliza la Ecuación N° 20 del Apartado 1.4.9.6.3.1.

$$4 \leq \frac{B}{b} \leq 6$$

$$4 \leq \frac{2}{0.44} \leq 6$$

$$4 \leq 4.55 \leq 6 = Ok$$

**Velocidad en el Vertedero**

La velocidad del agua que atraviesa por el vertedero se obtiene con la Ecuación N° 21 del apartado 1.4.9.6.6. La velocidad no debe ser mayor a las recomendadas en la Tabla N° 2: Valores recomendados para el diseño de la escalera de peces tipo artesa con vertedero.

$$V_v = \frac{Q_v}{b * \Delta h}$$

$$V_v = \frac{0.25}{0.44 * 0.2}$$

$$V_v = 2.84 \text{ m/s}$$

## ORIFICIO Y VERTEDERO

El dimensionamiento del orificio y vertedero se utilizan los mismos parámetros mencionadas en el subcapítulo 2.4.1.5 y 2.4.1.6, pero para determinar el caudal que atraviesa por la escalera se calcula con las ecuaciones del apartado 1.4.9.1.4.

**Caudal que atraviesa por el orificio:** El caudal que pasa por el orificio se determina con la Ecuación N° 7.

$$Q_o = Q_j * (g * S * b_s^5)^{0.5}$$
$$Q_o = 2.25 * (9.81 * 0.0775 * 0.41^5)^{0.5}$$
$$Q_o = 0.211 \text{ m}^3/\text{s}$$

**Caudal que atraviesa por el vertedero:** Se debe verificar si el caudal del vertedero es a descarga libre o sumergida, dependiendo de esta verificación se aplica la Ecuación N° 8 o Ecuación N° 9. La descarga es sumergida, según los cálculos realizados en el apartado 2.4.1.6.1.

$$Q_{vs} = Q_p * B * \Delta h^{\frac{3}{2}} * \sqrt{g * S}$$
$$Q_{vs} = 0.61 * 2 * 0.2^{\frac{3}{2}} * \sqrt{9.81 * 0.0775}$$
$$Q_{vs} = 0.0951 \text{ m}^3/\text{s}$$

**Caudal total que atraviesa por la escalera de peces:** Para obtener el caudal que atraviesa por el tabique con vertedero y orificio se determina con la Ecuación N° 11.

$$Q_{mixt} = Q_o + Q_v$$
$$Q_{mixt} = 0.211 + 0.0951$$
$$Q_{mixt} = 0.30 \text{ m}^3/\text{s}$$