

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

**DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE HERRAMIENTAS (MACROS) PARA EL
DIMENSIONAMIENTO DE ESCALERAS DE PECES**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MENCIÓN HIDRÁULICA**

EDWIN FERNANDO BARRERA LUNA

edwin_barreraluna@hotmail.com

DAYSIPAO1 SANUNGA CANDO

daysipao1@hotmail.com

DIRECTOR: ING. MSc. CRISTINA ALEXANDRA TORRES JACOBOWITZ

cristina.torresj@epn.edu.ec

CO-DIRECTOR: ING. Ph.D. KHALED MOHAMED AHMED HAMAD

khaled.hamad@epn.edu.ec

Quito, febrero 2021

DECLARACIÓN

Nosotros, Barrera Luna Edwin Fernando y Sanunga Cando Daysi a, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado todas las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa vigente.

EDWIN FERNANDO
BARRERA LUNA

DAYSI PAOLA
SANUNGA CANDO

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Edwin Fernando Barrera Luna y Daysi Paola Sanunga Cando, bajo mi supervisión

Ing. Cristina Torres J. M. Sc.
DIRECTOR DEL PROYECTO

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Edwin Fernando Barrera Luna y Daysi Paola Sanunga Cando, bajo nuestra supervisión

Ing. Cristina Torres J. M. Sc.
DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Khaled Hamad M. PhD.
CODIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A Dios, por cuidar siempre de mí, brindándome toda la fuerza y salud necesaria para poder seguir adelante.

A mis padres, Edgüin y Rosa, por el amor, compromiso, paciencia y sobre todo apoyo incondicional que me han dado, porque con sus enseñanzas y esfuerzo han dejado claro el mejor ejemplo de lo que significa ser padres.

A toda mi familia y en especial a mi hermano Luis y mis primas María Fernanda y María José que con su compañía y cariño han hecho que este largo camino sea más llevadero.

A mi compañera de tesis, Daysi Sanunga, por su amistad y entrega para que todo nuestro trabajo salga adelante y finalizar así una etapa importante de nuestras vidas.

A todos mis amigos, por estar conmigo en cada momento sean bueno o malos y hacer que esta etapa sea la mejor de mi vida hasta el momento.

A la Escuela Politécnica Nacional, a sus profesores por brindarme su conocimiento y transmitirme sus experiencias, a nuestra directora, Cristina Torres J. por su apoyo, paciencia y sobre todo confianza para realizar este trabajo junto, a nuestro codirector PhD. Khaled Hamad, que ha demostrado ser un señor en toda la extensión de la palabra.

EDWIN FERNANDO BARRERA LUNA

AGRADECIMIENTO

“Las palabras nunca alcanzan cuando lo que hay que decir desborda el alma.”

Julio Cortázar

A Dios por la oportunidad de seguir adelante y nunca dejarme decaer, por brindarme salud, bienestar y la fortaleza para no desmayar en cada uno de mis propósitos.

A mi padre Luis Sanunga que se encuentra en el cielo por cada una de sus enseñanzas, sus valores, su amor hacia mí, sus consejos y sobre todo por su entrega con cada uno de sus hijos.

A mi madre María Cando por su compromiso, amor, valores, pero sobre todo por su paciencia y por saber afrontar con entereza su rol de madre y padre en mis momentos más difíciles de mi desarrollo personal y profesional.

A mis hermanos por su amor, su paciencia, su amistad y su apoyo incondicional para conmigo ya que todo eso me permitieron seguir adelante sin renunciar y culminar esta etapa de mi vida.

A mis sobrinos por sus pequeñas sonrisas que me brindan cada día y que hacen que no me rinda y a su vez hacerme saber que hay alguien que sigue mis pasos y por los cuales no debo rendirme y seguir adelante.

Al resto de mi familia y amigos que a pesar de las circunstancias siempre

estuvieron dándome una palabra de aliento, han hecho de esta etapa una de las más bonitas. A mi compañero de tesis Edwin Barrera por su paciencia y por haber hecho que este sueño sea posible y que culminemos este proyecto de titulación y culminar esta etapa universitaria con gran satisfacción.

A la Escuela Politécnica Nacional, a la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental y a cada uno de los profesores que la conforman, que contribuyeron a mi desarrollo profesional ya que supieron transmitir con dedicación sus conocimientos para mi desarrollo profesional, pero sobre todo a mi directora de tesis Cristina Torres Jacobowitz por su paciencia, guía y apoyo para culminar el proyecto de titulación.

DAYSÍ PAOLA SANUNGA CANDO

DEDICATORIA

A mis abuelos, que ya no están junto a mí pero que desde algún lugar del cielo estarán orgullosos y sintiendo suyos este y todos mis triunfos.

EDWIN FERNANDO BARRERA LUNA

DEDICATORIA

Cuanto tiempo a pasado desde que inicie mi etapa universitaria, con altas y bajas he aprendido a no rendirme, he tenido enseñanzas de varias personas que han aportado significativamente a mi vida.

“La educación es el arma más poderosa que puedes usar para cambiar el mundo.”

Nelson Mandela.

Este trabajo lo dedico a mis padres Luis y María, a mis hermanos Jorge, Diana, Edison y Juan por su apoyo incondicional, a mis sobrinos David, Ian, Camilo y a cada una de las personas que aportaron su granito de arena a que este sueño se haga una realidad y culminar con satisfacción esta etapa de mi vida y a su vez impulsarme a ser una mejor persona cada día.

DAYSI PAOLA SANUNGA CANDO

CONTENIDO

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
CERTIFICACIÓN	IV
AGRADECIMIENTO	V
AGRADECIMIENTO	VI
DEDICATORIA	VIII
DEDICATORIA	IX
GLOSARIO	XXIV
RESUMEN.....	XXVIII
ABSTRACT.....	XXX
CAPÍTULO 1.....	1
GENERALIDADES	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	3
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3. ALCANCE	3

1.4. JUSTIFICACIÓN	4
CAPÍTULO 2.....	6
BASE TEÓRICA Y ESTUDIOS PREVIOS	6
2.1. BASE TEÓRICA.....	6
2.1.1. CAUDAL ECOLÓGICO	6
2.1.2. ESCALERAS DE PECES.....	8
2.1.2.1. Tipos de escaleras de peces	9
2.1.2.1.1. Ascensores de peces (o esclusa Borlan d).....	9
2.1.2.1.2. Exclusa de peces	11
2.1.2.1.3. Río artificial.....	13
2.1.2.1.4. Escalera ralentizadora (o escalera Denil)	15
2.1.2.1.5. Escalera artesa o estanques sucesivos.....	17
2.1.2.1.6. Escalera tipo ranura vertical o hendidura vertical	20
2.1.3. RESUMEN DE LOS TIPOS DE ESCALERAS	22
2.2. ESTUDIOS PREVIOS	25
2.2.1. INVESTIGACIONES REALIZADAS	25
2.2.1.1. Fish Passes -Design, dimensions, and monitoring	25
2.2.1.2. Guide passes à poissons	25

2.2.1.3. Modelización hidráulica de paso para peces ante diferentes escenarios hidrodinámicos	26
2.2.1.4. Proyecto de paso para peces sobre el azud del puente del ferrocarril de Burgos (Río Arlanzón)	26
2.2.1.5. Metodología para la evaluación de pasos para peces de estanques sucesivos	27
2.2.1.6. Evaluación de la efectividad de la escala de peces del Azud del río Ebro en Xerta (Tarragona)	27
2.2.1.7. Base de diseño de escaleras para peces	28
2.2.1.8. Aspects of Design and Monitoring of Nature-Like Fish Passes and Bottom Ramps.....	28
2.2.2. ESTADO DEL ARTE.....	29
2.2.3. ESTUDIOS DE IMPACTOS AMBIENTALES EN HIDROELÉCTRICAS DEL PAÍS	34
2.2.3.1. Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair	34
2.2.3.2. Central Hidroeléctrica Delsintanisagua	36
2.2.3.3. Central Hidroeléctrica Mazar.....	36
2.2.3.4. Central Hidroeléctrica Minas-San Francisco	38
2.2.3.5. Central Hidroeléctrica Paute-Sopladora.....	40
2.2.3.6. Central Hidroeléctrica Manduriacu	42

2.2.3.7. Central Hidroeléctrica Normandía	43
2.2.4. ESPECIES OBTENIDAS DE LOS ESTUDIOS AMBIENTALES	45
CAPITULO 3.....	48
METODOLOGÍA.....	48
2.3.FACTORES FÍSICOS E HIDRÁULICOS QUE INTERVIENE EN LA IMPLEMENTACIÓN DE ESCALERAS DE PECES	48
2.3.1. Biológicos:	49
2.3.2. Hidrológicos:	49
2.3.3. Hidráulicos:	49
2.3.4. Topográficos:	49
2.3.5. Gestión del agua:	50
2.4.ESCALERAS DE PECES ADAPTABLES A LAS CONDICIONES MÁS PROBABLES DEL ECUADOR	50
2.4.1. UBICACIÓN OPTIMA	57
2.4.2. CONDICIONES DE ENTRADA Y SALIDA	61
2.4.2.1. Entrada de la escalera	61
2.4.2.1.1. Condiciones por cumplirse en la entrada.....	63
2.4.2.2. Condiciones de Salida	64
2.4.2.2.1. Condiciones por cumplirse en la salida.....	64

2.4.3. LONGITUDES.....	65
2.4.4. PENDIENTES	67
2.4.5. TIEMPOS DE PERMANENCIA	67
CAPITULO 4.....	70
BASE DE DISEÑO DE LA ESCALERA DE PECES.....	70
4.1. ESPECIE OBJETIVO	70
4.1.1. VELOCIDAD MÁXIMA DEL PEZ (V_{max})	71
4.1.2. TIEMPO DE PERMANENCIA (t_p).....	71
4.1.3. VELOCIDAD DE NADO (V_n)	71
4.1.4. DISTANCIA RECORRIDA POR EL PEZ.....	72
4.2. BASE DE DISEÑO DE LA ESCALERA TIPO HENDIDURA VERTICAL..	72
4.2.1. ANCHO DE LA ESCOTADURA (b).....	75
4.2.2. DIMENSIONES DEL ESTANQUE.....	75
4.2.2.1. Largo del estanque (L).....	75
4.2.2.2. Ancho del estanque (B).....	75
4.2.3. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	76
4.2.4. CORTE LONGITUDINAL	78
4.2.5. VELOCIDAD EN LA HENDIDURA ($V_{m\acute{a}x}$)	80

4.2.6. CAUDAL POR TRANSITAR (Q).....	80
4.2.7. TURBULENCIA (E)	82
4.2.8. CONDICIONES DE DISEÑO	83
4.3. BASE DE DISEÑO DE LA ESCALERA TIPO ESTANQUES SUCESIVOS	84
4.3.1. ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DE DISEÑO (Q)	85
4.3.2. NÚMERO DE ESTANQUES (N)	86
4.3.3. DIMENSIONAMIENTO DEL ORIFICIO	87
4.3.3.1. Altura (hs) y base (bs) del orificio	87
4.3.3.2. Velocidad en el orificio (Vo).....	89
4.3.4. DIMENSIONAMIENTO DEL ESTANQUE	89
4.3.4.1. Calado mínimo en el estanque (hm)	89
4.3.4.2. Longitud del estanque (Le).....	90
4.3.5. DIMENSIONAMIENTO DE LA ESCALERA	92
4.3.5.1. Pendiente (S)	92
4.3.5.2. Longitud total de la escalera (LEtotal).....	93
4.3.5.3. Velocidad en la entrada (Va).....	94
4.3.5.4. Piscina a la entrada y salida de la escalera	94

CAPITULO 5.....	96
RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	96
5.1. DISEÑO DE HERRAMIENTA (MACROS).....	96
5.1.1. DISEÑO DE LA HERRAMIENTA PARA LA ESCALERA TIPO HENDIDURA VERTICAL.....	96
5.1.1.1. Escalera tipo Hendidura Vertical modelo I	96
5.1.1.2. Escalera tipo Hendidura Vertical modelo II	99
5.1.2. DISEÑO DE LA HERRAMIENTA PARA LA ESCALERA TIPO ESTANQUES SUCESIVOS.....	101
5.2. MANUAL DE USO.....	104
5.2.1. VENTANA DE INICIO	104
5.2.2. VENTANA DE ELECCIÓN DEL TIPO DE ESCALERA DE PECES	105
5.2.3. VENTANA DE DISEÑO DE LA ESCALERA TIPO ESTANQUES SUCESIVOS	106
5.2.4. VENTANA DE ESCALERA DE PECES TIPO HENDIDURA VERTICAL MODELO I	109
5.2.5. VENTANA DE ESCALERA DE PECES TIPO HENDIDURA VERTICAL MODELO II	110
5.3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	112
5.3.1. CÁLCULO DEL EJEMPLO PRÁCTICO	112

5.3.1.1. Escalera de peces tipo estanques sucesivos.....	112
5.3.1.1.1. Cálculo del caudal	112
5.3.1.1.2. Cálculo del número de estanques	113
5.3.1.1.3. Cálculo de las dimensiones del orificio	113
5.3.1.1.4. Cálculo de las dimensiones del estanque.....	115
5.3.1.1.5. Cálculo de las dimensiones de la piscina de entrada y salida	117
5.3.1.1.6. Capacidades natatorias de la especie objetivo	118
5.3.1.2. Escalera de peces tipo hendidura vertical modelo I	119
5.3.1.2.1. Dimensionamiento del estanque.....	119
5.3.1.2.1. Capacidades natatorias de la especie objetivo	125
5.3.1.3. Escalera de peces tipo II hendidura vertical	126
5.3.1.3.1. Dimensionamiento del estanque.....	126
5.3.1.3.2. Capacidades natatorias de la especie objetivo	131
CAPITULO 6.....	134
CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	134
6.1. CONCLUSIONES.....	134
6.2. RECOMENDACIONES	136

6.3. TRABAJOS FUTUROS	138
CAPITULO 7.....	139
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	139
ANEXOS.....	144
ANEXO 1 Código para la elaboración de la interfaz de la escalera tipo estanques sucesivos	Error! Bookmark not defined.
ANEXO 2 Código para la elaboración de la interfaz de la escalera tipo hendidura vertical modelo I.....	Error! Bookmark not defined.
ANEXO 3 Código para la elaboración de la interfaz de la escalera tipo hendidura vertical modelo II.....	Error! Bookmark not defined.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Corte transversal de un Ascensor de peces	10
Figura 2 Corte transversal de una Escalera tipo Esclusa	13
Figura 3 Escaleras de peces tipo río artificial	15
Figura 4 Vista de una Escalera tipo Denil.....	16
Figura 5 Escala de ralentizadores tipo	17
Figura 6 Escalera tipo artesa	19
Figura 7 Vista superior de la disposición de una escalera tipo artesa	19
Figura 8 Ejemplo de una escalera con dos hendiduras verticales	20
Figura 9 Vista de una escalera tipo ranura vertical con un orificio	21
Figura 10 Escalera de peces tipo ranura vertical en el río Porma	21
Figura 11 Caudales Medios Diarios (m ³ /s) de la cuenca GUAYLLABAMBA AJ BLANCO - datos Limnimétricos	54
Figura 12 Caudales Medios Diarios (m ³ /s) de la cuenca GUAYLLABAMBA AJ BLANCO	55
Figura 13 Ubicación de los pasos de peces si ambos lados son iguales o para presas grandes.....	57
Figura 14 Plano esquemático que ilustra la instalación de un paso de peces de manera correcta.....	58
Figura 15 Plano esquemático que ilustran la instalación de un paso de peces de manera correcta, pero con problemas de acceso y mantenimiento.....	59
Figura 16 Ubicación de la escalera de peces cerca de la casa de máquinas	60

Figura 17 Posición óptima de un canal de derivación y b) posición óptima de un paso de peces técnico.	60
Figura 18 Descarga adicional a través de un bypass en una antecámara para aumentar la atracción del flujo en la entrada de la escalera de peces.	62
Figura 19 Dimensionamiento del canal	63
Figura 20 Velocidad máxima de natación en función de la longitud corporal del pez (LC).....	66
Figura 21 Tiempo de permanencia en función de la LC.	68
Figura 22 Tiempo de permanencia - Velocidad de nado	69
Figura 23 Longitud corporal total del pez.	71
Figura 24 Diseño de escalera de peces de hendidura vertical. Modelo I.....	73
Figura 25 Diseño de escalera de peces de hendidura vertical. Modelo II.	74
Figura 26 Detalle del guiado del flujo de la escalera tipo hendidura vertical modelo I.	76
Figura 27 Corte Longitudinal de la sección del dispositivo.	78
Figura 28 Ábaco del coeficiente de descarga relacionando huho.....	82
Figura 29 Diseño de escalera de peces tipo estanques sucesivos.....	85
Figura 30 Corte transversal de la escalera de peces tipo estanques sucesivos con orificio sumergido.	88
Figura 31 Ventana de inicio de la herramienta macro.	105
Figura 32 Ventana de selección de los diferentes tipos de escaleras.....	106
Figura 33 Ventana de escalera de peces tipo estanques sucesivos.....	107

Figura 34 Ventana de los ábacos Velocidad máxima de nado – Longitud corporal, Tiempo de permanencia – Longitud corporal.	108
Figura 35 Ventana de tabla de dimensiones recomendadas para la escalera de peces en función del tamaño de pez.	109
Figura 36 Ventana de escalera de peces tipo hendidura vertical. Modelo I.	110
Figura 37 Ventana de escalera de peces tipo hendidura vertical. Modelo II.	111
Figura 38 Ventana de los ábacos Velocidad máxima de nado – Longitud corporal, Tiempo de permanencia – Longitud corporal y Coeficiente de descarga(μr).	111
Figura 39 Resultados de la MACRO de la escalera de peces tipo estanques sucesivos.	119
Figura 40 Resultados de la MACRO de la escalera de peces tipo hendidura vertical modelo I.	126
Figura 41 Resultados de la MACRO de la escalera de peces tipo hendidura vertical modelo II.	133

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de escaleras de peces	23
Tabla 2	Estado del arte	30
Tabla 3	Descripción de la zona de estudio e identificación de especies de la Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair	35
Tabla 4	Descripción de la zona de muestreo e identificación de especies en la Hidroeléctrica Mazar	37
Tabla 5	Descripción de la zona de muestreo de la Hidroeléctrica Minas-San Francisco	39
Tabla 6	Identificación de especies presentes en la Hidroeléctrica Minas-San Francisco	40
Tabla 7	Descripción de los sitios de monitoreo de la Hidroeléctrica Paute-Sopladora	41
Tabla 8	Identificación de las especies en la Hidroeléctrica Paute-Sopladora	42
Tabla 9	Especies encontradas en la zona de estudio	43
Tabla 10	Descripción del hábitat en la zona de muestreo e identificación de las especies de la Hidroeléctrica Normandía	44
Tabla 11	Resumen de las especies basado en los estudios ambientales de las centrales hidroeléctricas	45
Tabla 12	Comparación de diferentes sistemas de paso instalados en los ríos de América del Sur.	51
Tabla 13	Alturas de las presas y escaleras recomendables para su implementación.	56

Tabla 14 Dimensiones recomendadas para la escalera de peces en función del tamaño del pez.91

GLOSARIO

Aireación: es la técnica que se utiliza para el tratamiento de aguas, es decir la purificación biológica del agua mediante el uso de oxígeno.

Aguas turbias: son aquellas aguas que presentan un color café opaco, verde o blanquecino, también es de olor y sabor poco agradable.

Afluente torrentoso: es aquel río o arroyo que tiene curso rápido e impetuoso.

Batimetría: es el análisis de las profundidades marítimas que representan el relieve del fondo.

Bypass: es un canal de derivación que permite establecer un camino para atravesar de un lugar a otro sin obstruir el flujo.

Ciclos migratorios: son etapas de destino o retorno donde la migración representa la circulación a través de varios o un solo país.

Ciclos estacionarios: son etapas que muestran un comportamiento cíclico a lo largo de un cierto intervalo de tiempo.

Ciclo biológico: es el conjunto de permutaciones que percibe un organismo hasta el punto inicial donde empieza el nuevo cambio.

Corriente de atracción: es el flujo que se encuentra a la entrada de la escalera de peces, permitiendo a la especie objetivo ingresar a la estructura y seguir con su trayecto de paso.

Cuenca hidrográfica: es la unidad geográfica e hidrológica que está compuesta por un río principal y todos los ríos asociados a su origen. Es el área que incluye los ecosistemas y sus interacciones que aportan al cauce del río principal.

Deflector: es la estructura que evita que una sustancia fluya directamente a la salida

Desembocadura: es el sitio donde una corriente de agua converge, siendo la parte más baja de la corriente de agua. Puede ser un arroyo, canal de riego o el mar.

Equilibrio ecológico: es el estado del hábitat natural que se identifica de manera saludable basado en criterios ambientales, es decir que exista armonía y estabilidad en el medio en el que se desarrollan los seres vivos.

Embalse: es la acumulación artificial de agua, el cual es construido cuando se produce el cierre del cauce natural del río mediante una estructura que contiene el agua del río.

Erosión local: es la acción que se produce en el curso del agua, está asociada a singularidades u obstrucciones las cuales no afectan a los diferentes escenarios del flujo.

Esclusa: división que consta de puertas de entrada y salida, permitiendo la construcción de un canal lleno de agua. Para el paso de un extremo a otro de nivel diferente.

Escalera de peces: es la estructura diseñada para que la ictiofauna presente en el río pueda franquear los obstáculos sin ningún inconveniente y garantizando su continuidad en su traslado.

Escenario hidrodinámico: es el estado que acopla la dinámica de los fluidos

Estabulación: es el lugar donde se mantiene a los animales (en este caso a los peces) que se criarán dentro de un establecimiento, es un lugar donde pasaran gran parte de su vida.

Franquear: actividad que permite librarse de obstáculos o impedimentos.

Íctica: perteneciente a un pez o a todos los peces presentes en un determinado lugar sin tomar en cuenta la clasificación taxonómica.

Ictiofauna: es el conjunto de especies de peces que están presentes en una región biogeográfica determinada, la variedad biológica y los diferentes factores abióticos tienen un estrecho vínculo.

Longitud corporal: es la longitud que se mide la extensión de un cuerpo de manera lineal.

Número de froude: es un número adimensional que está relacionado entre las fuerzas inerciales y las fuerzas de gravedad presentes en un fluido, este coeficiente puede definir si el flujo es crítico ($Fr=1$), supercrítico ($Fr<1$) o subcrítico ($Fr>1$).

Obstáculo: se entiende por obstáculo al tamaño de la presa que se encuentre presente en el cauce del río y que produzca una obstaculización.

Perturbación: está asociada a las permutaciones en la naturaleza de los depósitos aluviales en el tiempo

Presa: es aquella obra que permite regular o inmovilizar el trayecto del agua, es el lugar donde el agua del cauce natural del río es retenida siendo de manera natural o artificial. Contiene muros de hormigón, piedra u otro elemento que simule un muro para contener el agua.

Remanso: es la detención de un afluente de agua.

Salto hidráulico: es una permutación abrupta entre la altura y la velocidad del afluente, generando turbulencia y permutaciones en el flujo. Es un fenómeno hidráulico que se presentan en ríos o aliviaderos.

Sedimento: es un conjunto de partículas que se depositan en el fondo del río.

Topografía: es la representación gráfica de una superficie con sus detalles planimétricos y altimétricos utilizando un sistema de coordenadas.

Turbulencia: es un régimen de un fluido representado por movimientos desordenados de las partículas y cambios en la presión y velocidad del río

Velocidad de nado: es la velocidad que en cierto intervalo de tiempo el pez puede conservar.

RESUMEN

Siendo la construcción de presas una de las principales causantes de la destrucción de los ecosistemas ya que limita la migración y reproducción de la ictiofauna, la construcción de estructuras de paso que permitan a estas especies cruzar dichas presas es de gran importancia. En este contexto, el uso de escaleras de peces podría ayudar a que estas especies puedan atravesar estas estructuras permitiendo así la conservación de sus especies.

El presente trabajo posee un análisis de los distintos tipos de escaleras existentes, determinando sus ventajas y limitaciones según investigaciones ya realizadas por distintas universidades en países como España, Francia y Estados Unidos. También se realiza una recopilación de las especies acuáticas principales encontradas en los ríos del Ecuador, para esto se recopiló los estudios de impacto ambiental abiertos al público de presas de nuestro país.

A continuación, se usan los análisis ya mencionados y también ábacos que permiten determinar la velocidad de nado y tiempo de permanencia de peces según las capacidades natatorias de los peces, elaborando una MACRO que permite diseñar los dos tipos de escaleras de peces que mejor se adaptaron a la ictiofauna y ríos del Ecuador, siendo estos la escalera de tipo de estanques sucesivos y la escalera de tipo I y II de hendidura vertical. De esta forma se consigue una herramienta que permite que el diseño de estas estructuras de paso posea condiciones aptas para el cruce de los peces.

Los resultados se presentan a través de un ejemplo práctico donde se detalla el proceso de cálculo que la MACRO emplea para obtener sus resultados, también se

añade un video tutorial que facilita el manejo de la MACRO, permitiendo así el correcto uso de esta herramienta.

Palabras clave: Escalera de peces, estructuras de paso, estanques sucesivos, hendidura vertical.

ABSTRACT

The dam's constructions are one of the most important reasons of destruction of ecosystems, it is for one cause of ichthyofauna migration and reproduction limitation. Construction of this passing structures to permit these species to passing by the dams is very important. In this context, using fish passes could help to these species to go through dams and finally helping to the species conservation.

The present paper has an analysis of the different types of the existent fish passes, suggesting its advantages and limitations according to research already carried out by universities in other countries like Spain, France and The United States. Also, a collection of the most important aquatic species found in the Ecuadorian rivers is made. For this, a recollection and analysis of public domain environmental impact about dams in Ecuador.

Following, analysis already mentioned, and abacus are used to set up swim velocity, stay time of the fishes according to its capacities to making a MACRO (computer coding) that could follow a design for two types of fish passes which can better adapt to the ichthyofauna on the Ecuadorian rivers. These fish passes being of successive ponds and each slot passes. In this way, the tool that allows the design for this passing structure has suitable conditions for the fish crossing.

The results are presented through a practical example where is detailed the calculation process that the MACRO uses to obtain the results, a tutorial video is also added that facilitates the handling of the MACRO, allowing the correct use of this tool.

Keywords: fish passes, passing structure, successive pool, slot passes.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

En el presente capítulo se describe una breve información con relación al objeto de estudio, además se detalla los objetivos, el alcance y justificación del proyecto de titulación.

1.1. ANTECEDENTES

El ser humano ha realizado alteraciones en la trayectoria del agua a lo largo del tiempo debido a las necesidades que han surgido por la humanidad; por tal razón se han construido estructuras transversales para satisfacer dichas necesidades. Generando un impacto sobre las especies existentes en los ríos y a su vez interrumpiendo la comunicación aguas arriba como aguas abajo de los ríos. El efecto que se genera limita la migración de las especies y su reproducción. Incluso en algunos de los casos pueden llegar a desaparecer la comunidad de peces ya sea por factores de contaminación, la pesca indiscriminada, depredadores o la introducción de especies, encauzamiento, etc. (Valbuena, 2015).

Por lo tanto, se han generado soluciones que permitan reducir los efectos que se producen por la construcción de obras hidráulicas como presas, azudes entre otros. Los peces se mueven a lo largo del transcurso del agua ya sea por encontrar zonas de reproducción, refugio o alimento (Champutiz, 2013). Además, los peces retrasan su desplazamiento por obtener condiciones adecuadas para su supervivencia.

El estudio del paso de peces es reducido y poco fiable debido a que el efecto puede ser negativo como positivo ya que no se garantiza que la comunidad de especies supere los obstáculos o que ingresen a la estructura. Por ende, se debe poner

el mayor empeño en considerar todas las variables hidráulicas y de dimensionamiento. Existen varios estudios que se han realizado en mayor parte en países de Europa y Estados Unidos para especies salmónidas, en el caso de América del Sur tenemos pocos casos que se han suscitado ya que es un tema relativamente nuevo y que genera gran interés en modelos hidráulicos y en la preservación ambiental (CHD, 2016).

Por tal motivo, se debe tener en cuenta que las estructuras existentes o las que se van a construir, apliquen metodologías adecuadas de dimensionamiento, funcionalidad y monitoreo garantizando un equilibrio ecológico (Valbuena, 2015).

En Ecuador según el registro oficial N° 41 del 14 de marzo del 2007 prescribe normas para determinar el caudal ecológico (el cual debe ser representativo del régimen natural del río) en cuencas hidrográficas; en caso de las centrales hidroeléctricas se debe asegurar la conservación y mantenimiento de los ecosistemas y la biodiversidad de los ríos y asegurar los usos consuntivos y no consuntivos del recurso, aguas abajo en el área de influencia de la central. Adicional a esto, la entidad administradora de los recursos hídricos deberá garantizar el cambio o alteración de caudales; ejecutando estudios para la determinación de un caudal ecológico en los proyectos hidroeléctricos que involucren represamiento y a su vez hacer respetar el caudal ecológico aprobado por el CONELEC (R. O. 41 del 14 de marzo , 2007).

En el registro también menciona normas para el mantenimiento de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, en sectores hidrográficos y embalses. Donde señala que se debe garantizar a través de medidas (las cuales se deben mencionar en el estudio de impacto ambiental al inicio del proyecto) que los impactos sean mínimos en el ecosistema del río conforme lo establecido en el Art. 59 del RLGAPCA (Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental). Dichas medidas deben comprender estructuras

hidráulicas como: escalinatas o paso para la migración de peces, desagües de fondo, etc.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del proyecto de titulación se basa en generar herramientas (MACROS) tomando en cuenta las variables hidráulicas que permitan la optimización del diseño de escaleras de peces.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A continuación, se exponen los objetivos específicos que guardan relación con el objetivo general planteado:

- ❖ Identificar los tipos de escaleras de peces mediante la revisión de estudios previos e indagación bibliográfica respecto al tema.
- ❖ Analizar los diferentes parámetros que influyen en el dimensionamiento de las escaleras de peces, garantizando su adaptabilidad a los ríos de nuestro país.
- ❖ Programar dos de las alternativas óptimas entre los diferentes tipos de escaleras de peces, utilizando el uso de macros lo cual nos permitirá automatizar la programación.
- ❖ Evaluar las herramientas con un ejemplo de diseño, para validar su correcto funcionamiento.

1.3. ALCANCE

La presente investigación se enfoca en el estudio de las escaleras de peces, su clasificación y el análisis de las variables hidráulicas que influyen en su

dimensionamiento, mediante la revisión bibliográfica e investigación de trabajos realizados. Además, en Ecuador en el año 2007 se decretó al CONELEC como autoridad ambiental y se solicitó la construcción de estructuras que preserven el equilibrio ecológico (R. O. 41 del 14 de marzo , 2007). Desde el 2014 el ente encargado de formular, gestionar y supervisar el plan anual de prioridades en infraestructura hidráulica, equipamiento, drenaje e inundaciones y administrar la infraestructura hidráulica de propósito múltiple es la Autoridad Única del Agua (Asamblea Nacional Constituyente, 2014).

De acuerdo con los diferentes tipos de escaleras de peces analizados se seleccionaron dos tipos de ellos, tomando en cuenta que se adapten a las condiciones hidráulicas de nuestros ríos. Además, se incluyó una herramienta para automatizar el cálculo y/o diseño de las estructuras seleccionadas y su comprobación mediante el adecuado funcionamiento de la herramienta generada.

1.4. JUSTIFICACIÓN

El diseño hidráulico determina los componentes, dimensionamiento y funcionamiento de las estructuras hidráulicas, de tal manera que se apliquen a las necesidades de se haya establecido.

Existe una gran variedad de condiciones morfológicas que poseen los ríos, los cuales nos permiten determinar sus distintas características en velocidad, arrastre de sólidos, calado y de más aspectos importantes al momento de diseñar cualquier tipo de estructura que se vaya a construir y ubicar dentro de su cauce (Vide, 2003). Dichas condiciones generan un hábitat distinto para los peces, siendo parte importante para considerar en el diseño de una escalera de peces ya que estas especies requieren condiciones hidráulicas favorables para su supervivencia, mismas que no solo dependen de su dimensionamiento, sino también factores como su ubicación y el revestimiento del fondo (FAO, 2002).

Se desarrollará un software, es decir un programa de cómputo en el que se permita desarrollar el diseño de la escalera de peces implementando lo antes mencionado.

Debido a la falta de una herramienta de cálculo de libre acceso provoca que el diseño de las escaleras de peces sea un trabajo largo y tedioso. Por tal razón, se crea una herramienta de cálculo (MACRO) para el diseñador, permitiéndole reducir el tiempo de cálculo y la dificultad de este debido a que usa una secuencia de operaciones en las cuales los datos están enlazados unos a otros, facilitando la organización y presentación de la información de una manera clara y precisa (Raviolo, 2002). Es así como, el diseño de una herramienta de cálculo diseñada técnicamente, permitirá emular estas características hidráulicas en el diseño, ayudando así a la conservación de su especie (FAO, 2002).

CAPÍTULO 2

BASE TEÓRICA Y ESTUDIOS PREVIOS

En el presente capítulo, se muestra la base teórica para el desarrollo del proyecto de titulación, además se presentan estudios de diseño de escaleras de peces.

2.1. BASE TEÓRICA

2.1.1. CAUDAL ECOLÓGICO

En Ecuador en el año 2007 según el Acuerdo Ministerial N° 155 define al caudal ecológico de la siguiente manera:

El caudal ecológico es el caudal de agua que debe mantenerse en un sector hidrográfico del río, para la conservación y mantenimiento de los ecosistemas, la biodiversidad y calidad del medio fluvial y para asegurar los usos consuntivos y no consuntivos del recurso, aguas abajo en el área de influencia de una central hidroeléctrica y su embalse, en donde sea aplicable. El caudal ecológico debe ser representativo del régimen natural del río y mantener las características paisajísticas del medio (R. O. 41 del 14 de marzo , 2007).

El reglamento aprobado el 6 de agosto del 2014 define al caudal ecológico de la manera siguiente:

Caudal ecológico es la cantidad de agua, expresada en términos de magnitud, duración, época y frecuencia del caudal específico y la calidad del agua expresada en términos de rango, frecuencia y duración de la concentración de parámetros que se

requieren para mantener un nivel adecuado de salud en el ecosistema (R. O. 305 del 06 de agosto , 2014).

Según la Ley Orgánica de Recursos hídricos, Usos y Aprovechamiento del agua, el caudal ecológico está definido como:

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 requieren para mantener un nivel adecuado de salud en el ecosistema. (Asamblea Nacional Constituyente, 2014),

Según el Centro Ecuatoriano de Derecho Ambiental define al caudal ecológico como la cantidad de agua necesaria que debe existir en un determinado cuerpo de agua para garantizar su funcionalidad (Arias, 2012).

Oyola (2017), define al caudal ecológico como el caudal que restringe el uso del agua durante las estaciones de sequía, es decir en la época donde se poseen caudales bajos. Dicho caudal debe ser el necesario para que se mantenga la vida en el río.

Por otro lado, la recopilación de información realizada en Champutiz (2013), el caudal ecológico en el Ecuador se lo calcula en base a un porcentaje del caudal natural del río, asignándole un valor constante de acuerdo con los siguientes parámetros:

- El caudal ecológico será igual al 10% del caudal mínimo promedio anual.
- El caudal ecológico será igual al 50% del caudal con probabilidad de excedencia del 95% del caudal mínimo de estiaje del año.

2.1.2. ESCALERAS DE PECES

Las escaleras de peces están diseñadas para que los peces puedan superar obstáculos existentes en el río. Estos por lo general son vías de agua franqueables por los peces con la finalidad de conducirlos arriba de dicho obstáculo (Martínez de Azagra, 1999).

Estas estructuras no solamente toman en cuenta la finalidad ya mencionada, sino también la de disipar correctamente la energía del agua que transitará por este paso. De tal manera es de suma importancia que el diseño sea realizado correctamente según las especies que habitan en el río (Champutiz, 2013).

Según el reporte técnico elaborado por Martínez de Azagra (1999), las condiciones óptimas de funcionamiento por cumplir para una escalera de peces son:

- La entrada debe ser de fácil ubicación y acceso para los peces.
- El trayecto no debe representar un reto o generar un gran estrés en los peces y mucho menos provocar algún tipo de lesión en ellos.
- La salida debe ser hacia un lugar seguro, donde los peces hayan superado zonas turbulentas o estructuras que representen un peligro.
- El diseño debe ser lo más apto para distintas especies, haciéndola una estructura franqueable para todos ellos.
- Evitar las colas o amontonamientos de peces en su estructura.
- El diseño debe ser capaz de permitir su funcionamiento durante crecidas y estiajes.
- Poseer un mantenimiento e inspección periódicos.

2.1.2.1. Tipos de escaleras de peces

La siguiente clasificación de tipos de escaleras de peces está basada solo en las estructuras que posean estudios previos en cuanto a su efectividad. Esta forma de clasificación nos permite destacar los siguientes diseños:

- Ascensor de peces
- Esclusa de peces (o esclusa Borland)
- Río artificial
- Escalera de ralentización (o escalera Denil)
- Escalera de artesa (o estanques sucesivos)
- Escalera de ranura vertical (o hendidura vertical)

Cabe mencionar que existen otros tipos de diseño de escaleras de peces. Estas distintas alternativas no han sido mencionadas ya que pueden ser añadidas en los grupos anteriores debido a su gran similitud de diseño y funcionamiento (Martínez de Azagra, 1999).

2.1.2.1.1. Ascensores de peces (o esclusa Borland)

Es un sistema mecánico que consta de una jaula o caja tipo ascensor, ubicada en la zona de concentración de peces, la cual sube y coloca su contenido aguas arriba del obstáculo o barrera que impide el trayecto normal de los peces (Sanz et al., 2013).

Este tipo de mecanismo tiene como principal ventaja el ser capaz de superar cualquier desnivel, lo cual lo convierte en una buena opción para obstáculos de gran altura (superiores a 6 metros). Otra de sus ventajas viene a ser el poco espacio que este ascensor requiere para su funcionamiento, siendo una opción muy viable para diseños donde el área de la obra sea limitada. Este sistema también nos permite tener

un conteo fácil de los peces. Esto facilita el cálculo de la eficiencia del mecanismo en el lugar de su implantación (Martínez de Azagra, 1999) .

Cabe resaltar que, si las especies que ahí habitan no poseen grandes capacidades biológicas para ascender por sí solas un trayecto, este dispositivo mecánico es el ideal para ellas (DVWK, 1996).

Este ascensor de peces presenta como desventajas el costo de construcción, operación y mantenimiento que conlleva su aplicación (DVWK, 1996).

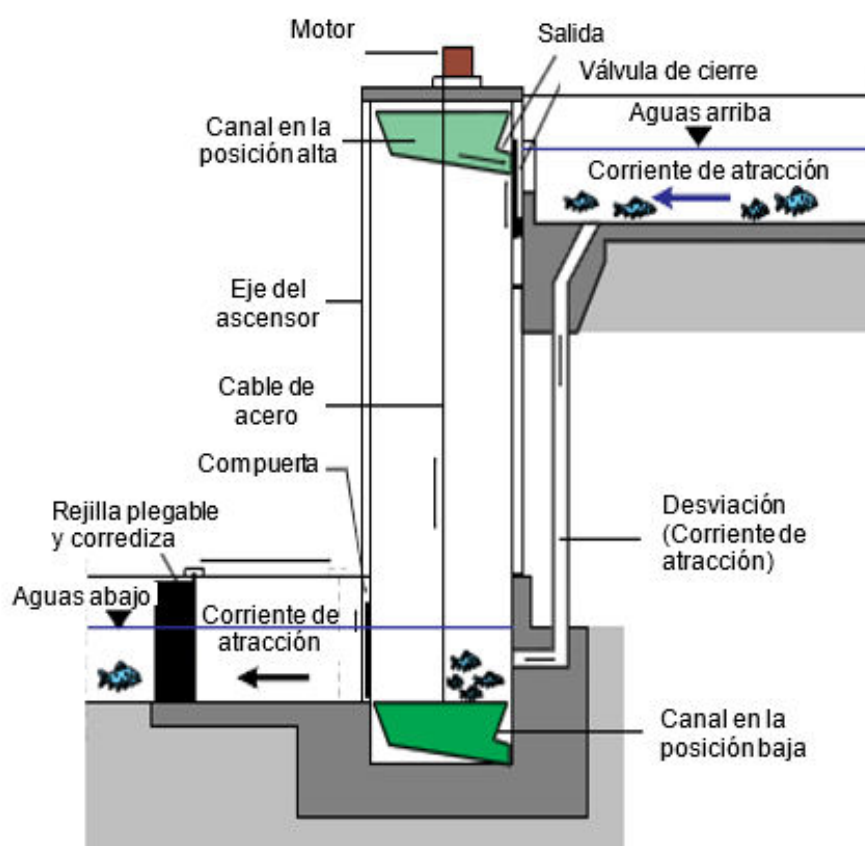


Figura 1 Corte transversal de un Ascensor de peces

Fuente: DVWK (1996)

2.1.2.1.2. Esclusa de peces

Este es un dispositivo que trabaja de forma muy similar a la de una esclusa de navegación, pero se deben tomar como aspecto importante la que la capacidad de atracción de la corriente debe ser la adecuada para que los peces se dirijan hacia este tipo de escalera (Sanz et al., 2013).

Las partes con las que debe contar una esclusa de peces son dos cámaras, la estabulación y la superior, cada una con compuertas de acceso y conectadas entre sí a través de un conducto por el cual el pez podrá ascender. También poseen un bypass por el cual se realiza el vaciado de la esclusa (Martínez de Azagra, 1999).

Funcionamiento de una esclusa de peces

Su funcionamiento consta de 4 etapas:

1. Fase de atracción:

El proceso empieza con la compuerta superior está cerrada y, por el contrario, la compuerta inferior está abierta dejando el nivel del agua del canal a la misma altura que el nivel aguas abajo. Se abrirá ligeramente la compuerta superior para generar una corriente de atracción y que los peces ingresen a la cámara inferior (DVWK, 1996). Este proceso durará un aproximado entre 1 y 3 horas (Martínez de Azagra, 1999).

2. Fase de llenado:

Con los peces ya en el interior de la cámara se procede a cerrar la compuerta inferior y a abrir lentamente la compuerta superior, de esta forma el canal de

ascenso empieza a llenarse y los peces empiezan a subir conforme el nivel de agua también lo hace (DVWK, 1996). Este proceso durará un aproximado entre 15 y 30 minutos (Martínez de Azagra, 1999).

3. Fase de salida:

Con el nivel de agua nivelado entre el canal superior y el nivel aguas arriba, se abre el bypass en la parte inferior, provocando una corriente de atracción la cual provoca la salida de los peces de la esclusa (DVWK, 1996). Este proceso durará un aproximado entre 30 y 60 minutos (Martínez de Azagra, 1999).

4. Fase de vaciado:

Con la totalidad de los peces fuera del mecanismo, se cierra la compuerta superior y se deja que el bypass vacíe la cámara y empezar un nuevo ciclo de funcionamiento (DVWK, 1996). Este proceso durará un aproximado de 15 minutos (Martínez de Azagra, 1999).

Este sistema tiene como ventaja principal el cruzar cualquier tipo de desnivel, pero siempre tomando en cuenta la inclinación dentro del canal, misma que no requiere de ella si es inferior a los 5 metros de altura. Este sistema también es ideal para peces pequeños ya que no requiere de rejas, facilitando así su migración (Fuentes, 2017).

La principal desventaja es el mantenimiento y el monitoreo constante que requiere para precautelar la seguridad de los peces al momento de la activación de sus compuertas. Esta estructura al igual que los ascensores tampoco brinda un retorno de peces aguas abajo (DVWK, 1996).

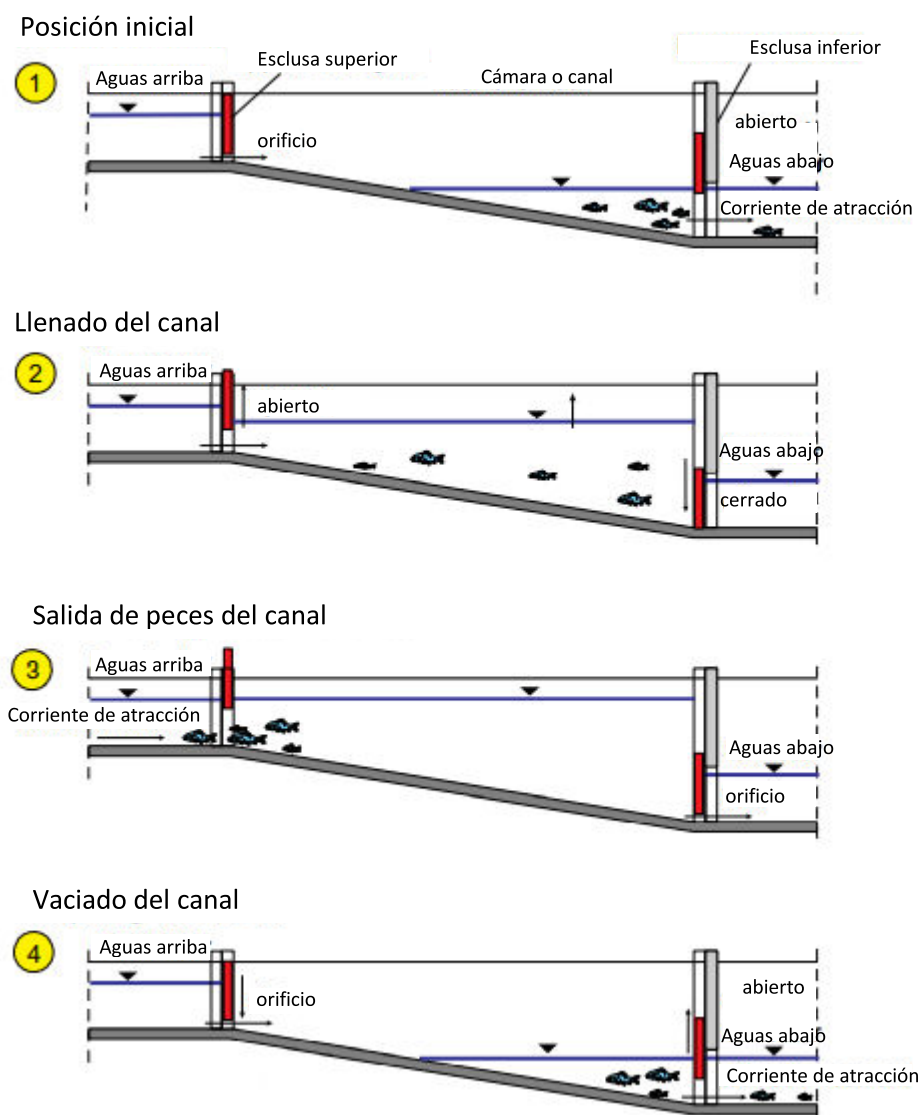


Figura 2 Corte transversal de una Escalera tipo Exclusa

Fuente: DVWK (1996)

2.1.2.1.3. Río artificial

Para que los peces puedan superar un obstáculo se construye un canal como ruta alternativa, el cual está dividido en tramos, este por lo general posee una

pendiente entre 3 y 5 %, el fondo de este río artificial posee escollera o material rugoso el cual cumple con la finalidad de frenar la potencia de la corriente y así permitir que los peces puedan ascender (Sanz et al., 2013).

Esta opción es muy amigable con el entorno ya que se integra perfectamente con la naturaleza, también posee la gran ventaja que si funciona como ruta de retorno para los peces (Martínez de Azagra, 1999).

Debemos considerar que este río artificial solo sirve para sortear obstáculos pequeños, inferior a 3 metros de altura, debido a que para superar alturas mayores se necesitan longitudes de desarrollo demasiado grandes. También se debe tomar en cuenta que el nivel de agua debe ser muy estable en la cabecera para que los peces puedan transitar sin problemas por el canal (Martínez de Azagra, 1999).

En la siguiente fotografía se muestra una escalera de peces del tipo río artificial donde vemos claramente cómo encaja de manera natural en el ambiente y facilitara a los peces cruzar el obstáculo que impide su paso normalmente.



Figura 3 Escaleras de peces tipo río artificial

Fuente: Sanz et al. (2013).

2.1.2.1.4. Escalera ralentizadora (o escalera Denil)

Este tipo de estructura está formado por un canal recto con pendientes entre 10 y 20%, esto gracias a la incorporación de deflectores que ayudan a reducir la velocidad del flujo permitiendo así que los peces puedan ascender por dicho canal. A pesar de la existencia de deflectores este tipo de escalera está pensada para peces con capacidades natatorias altas (salmónidos) (Sanz et al., 2013).

Existen varios tipos de deflectores, pero se los pueden resumir en cuatro tipos: deflectores planos, deflectores fatou, deflectores de fondo superactivos y deflectores de fondo grueso. Los ensayos y la practica han demostrado una mayor eficiencia en los deflectores planos, por lo que son los más utilizados (Martínez de Azagra, 1999).

Su diseño permite reducir la extensión de obra debido a las altas pendientes que poseen. Al poseer partes que pueden ser elaboradas fuera del lugar donde serán

instaladas las convierten en estructuras ideales para obras donde antes no existía un sistema de que permita la migración de peces (DVWK, 1996).

Las altas pendientes que usan también pueden ser una desventaja ya que se recomienda su uso solo para superar obstáculos entre 2 y 4 metros de altura. También las condiciones de los niveles de agua tanto en la parte superior como inferior deben ser estables, factores que reducen el campo de aplicación de estas (Martínez de Azagra, 1999).

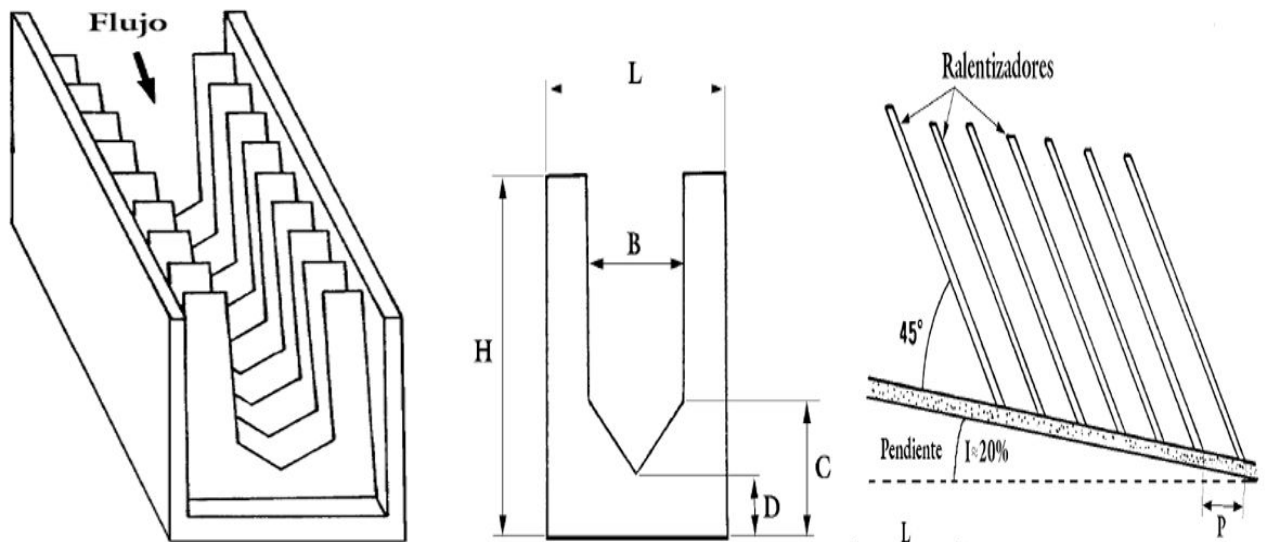


Figura 4 Vista de una Escalera tipo Denil

Fuente: Martínez de Azagra (1999)



Figura 5 Escala de ralentizadores tipo

Fuente: Sanz et al. (2013).

2.1.2.1.5. Escalera artesana o estanques sucesivos

El principio de este tipo de escalera de peces consiste en diseñar un canal que va desde la zona donde el caudal es obstaculizado hasta la zona donde se quiera trasladar a los peces (DVWK, 1996).

Este canal posee escalones mediante la colocación de paredes transversales los cuales ayudarán a disipar la energía del flujo de agua y a su vez sirven como áreas de descanso para los peces, también poseen ranuras y orificios en la parte superior e inferior las cuales permitirán el paso de los peces y del agua de un escalón a otro, mismo que están ubicados de manera alternada en las paredes transversales (DVWK, 1996).

Las dimensiones de los escalones son de 2 y 3 metros de largo y de 1 a 2 metros de ancho. Dichos elementos están conectados entre sí por saltos de 15 a 30 centímetros de altura. Estas dimensiones dependen de las especies que deban atravesar esta estructura (Sanz et al., 2013).

Hay que señalar que en este diseño los peces solamente sufren de fuertes velocidades durante el paso por cada pared transversal, ya que es cada escalón las velocidades del flujo son bajas. Otro detalle que permite una mejor adaptación de los peces al cruzar esta estructura es colocar un fondo similar al que la naturaleza ofrece en la zona (DVWK, 1996).

Las escaleras de artesas es la estructura más utilizada, esto se debe a que se la puede diseñar de una manera no selectiva para las especies, esto se lograría construyendo peldaños de un tamaño reducido. Otro factor que influye a su alta aplicación es que su diseño admite cambios bruscos de dirección lo cual ayuda a que puedan ser incorporados en sus diseños a pesar de la dificultad de espacio o topografía. Son estructuras que requieren muy poco mantenimiento ya que su diseño les permite una auto limpieza (Martínez de Azagra, 1999).

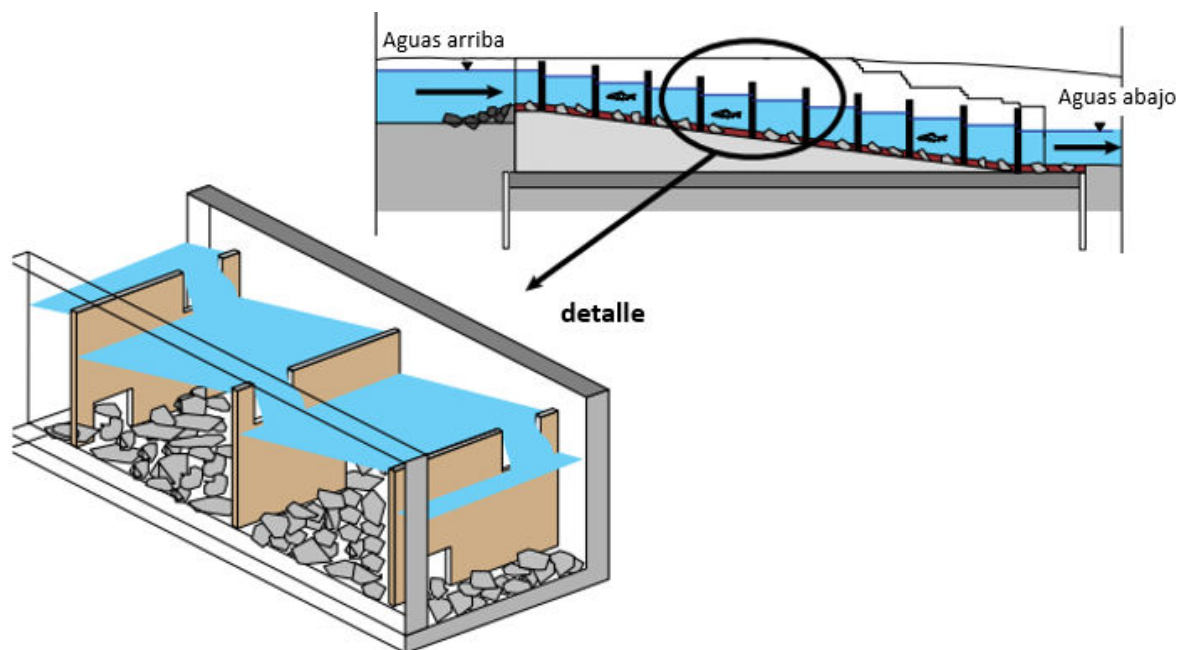


Figura 6 Escalera tipo artesa

Fuente: DVWK (1996)

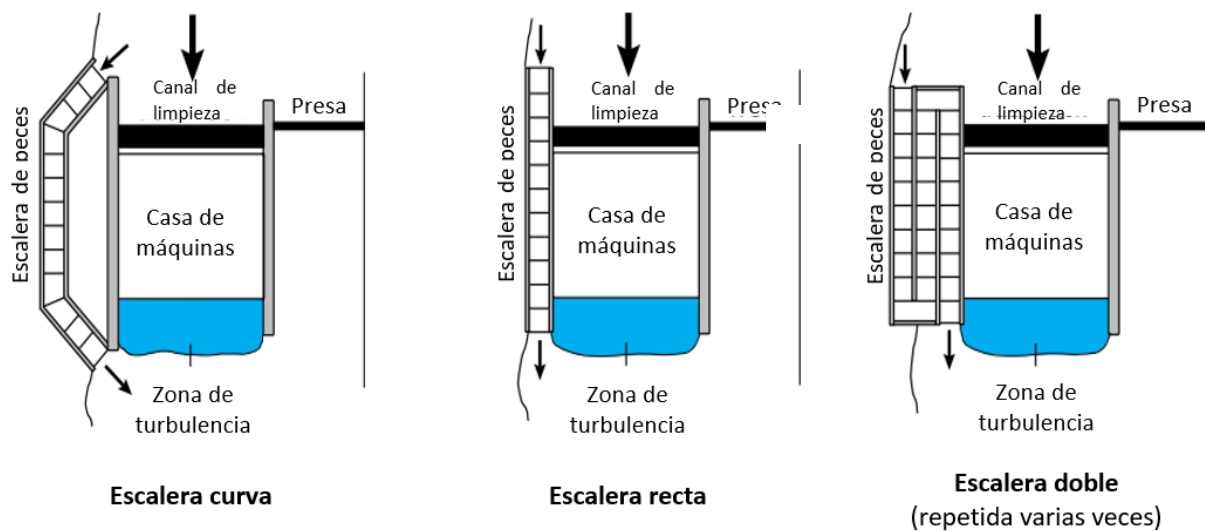


Figura 7 Vista superior de la disposición de una escalera tipo artesa

Fuente: DVWK (1996)

2.1.2.1.6. Escalera tipo ranura vertical o hendidura vertical

Esta estructura es muy similar a la escalera de artesa, fue desarrollada en América del Norte, lugar donde es muy utilizada. La principal diferencia de esta escalera es que la ranura es un corte vertical completo en la pared transversal. A diferencia de la escalera de artesa, aquí sus hendiduras siempre estarán ubicadas en el mismo lado, cabe mencionar que pueden existir escaleras de una hendidura o dos, las cuales irán ubicadas en lados opuestos, este número de hendiduras dependerá del flujo de agua y dimensiones (DVWK, 1996).

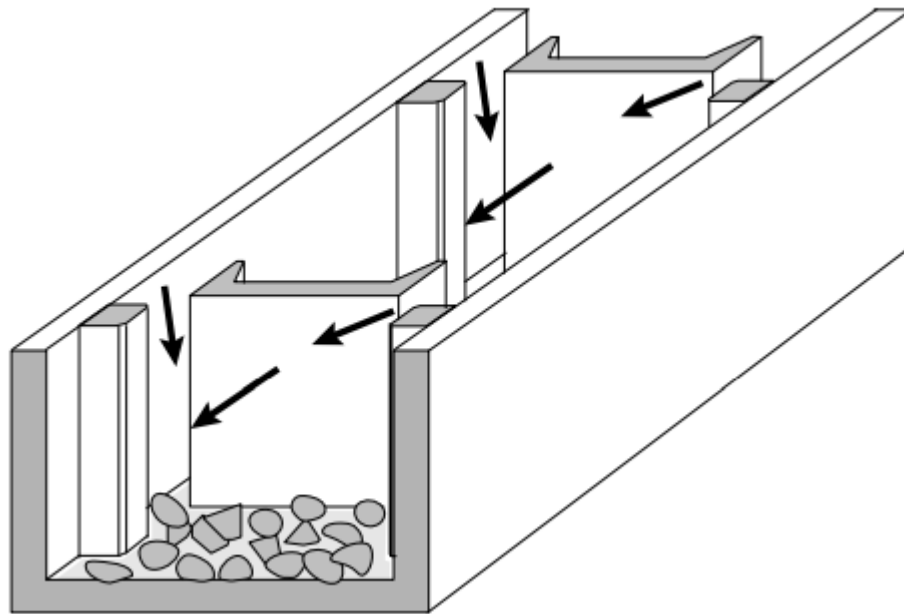


Figura 8 Ejemplo de una escalera con dos hendiduras verticales

Fuente: DVWK (1996)

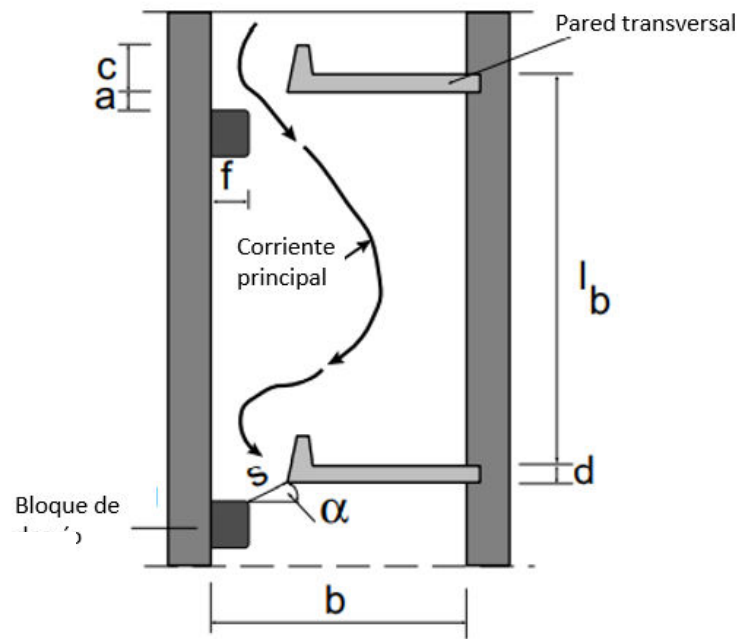


Figura 9 Vista de una escalera tipo ranura vertical con un orificio

Fuente: DVWK (1996)



Figura 10 Escalera de peces tipo ranura vertical en el río Porma

Fuente: Sanz et al. (2013).

2.1.3. RESUMEN DE LOS TIPOS DE ESCALERAS

A continuación, se presenta una tabla resumen de los diferentes tipos de escaleras que contiene el principio que maneja cada tipo, el rango de aplicación, sus ventajas y desventajas.

Tabla 1

Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de escaleras de peces

Tipo	Principio	Rango de aplicación	Ventajas	Desventajas
Ascensores de peces	Sistema mecánico que traslada a los peces desde la zona de concentración a otras aguas arriba por medio de una canasta.	Aplicable para cualquier tipo de desnivel. Recomendable para desniveles mayores a 8 metros.	Independiente de los niveles de agua. Ocupa poco espacio de construcción.	Costos elevados para pequeños desniveles. Gastos de energía eléctrica.
Esclusa de peces	Sistema de dos cámaras conectadas entre sí por un conducto por el cual los peces subirán a través de compuertas.	Aplicable para cualquier tipo de desnivel. Recomendable para desniveles inferiores a 5 metros.	ideal para especies de cualquier tamaño. Requiere de menores caudales.	Control de mantenimiento rutinario. Su funcionamiento es discontinuo.
Río artificial	Ruta alternativa rústica de material rugoso para reducir la velocidad del agua.	Aplicable a obstáculos inferiores a 3 metros. Recomendable uso de pendientes entre 3 y 5%.	Amigable con el entorno. Bajos costos de construcción.	Requiere niveles de agua estables. Espacio de construcción considerable.

Tipo	Principio	Rango de aplicación	Ventajas	Desventajas
Escalera ralentizadora	Canal recto de fuerte pendiente con deflectores que reducen la velocidad por medio de la disipación de energía.	Aplicable para obstáculos entre 2 y 4 metros. Aplicable con pendientes entre el 15 y 25%.	Poco espacio requerido de construcción. Se integran fácilmente a obras existentes.	Pasos selectivos para especies con grandes capacidades natatorias. Requiere niveles de agua muy estables.
Escalera artesa	Canal con forma de estanques debido a paredes transversales que ayudan a la disipación de energía.	Aplicable para obstáculos inferiores a 4 metros. Recomendable para pendientes entre 5 y 15%.	Trabajan con un amplio rango de caudales. No selectiva de peces. Aplicable para cambios bruscos de dirección.	Costos de construcción considerables. Requieren una corriente de atracción importante. Costos de construcción considerables.
Escalera de hendidura vertical	Canal con forma de escalones debido a paredes transversales con una o dos ranuras verticales que cubren toda su altura.	Aplicable para obstáculos inferiores a 4 metros. Recomendable para pendientes entre 5 y 15%.	No dependen del caudal de ingreso. No selectiva de peces. Aplicable para cambios bruscos de dirección.	Necesita mantenimiento constante. Requieren una corriente de atracción importante. Necesita mantenimiento constante.

Elaborado por: Barrera y Sanunga

2.2. ESTUDIOS PREVIOS

Basado en la bibliografía consultada se define algunos registros de diseño de escalera de peces o paso de peces que se han realizado en países como España, Estados Unidos entre otros. Estos estudios toman en cuenta su facilidad de construcción, su funcionamiento y adaptabilidad a las condiciones del río y a la especie presente en el río. Toda la información recopilada ha sido una base importante dentro de la investigación.

2.2.1. INVESTIGACIONES REALIZADAS

2.2.1.1. Fish Passes -Design, dimensions, and monitoring

Este Libro traducido al inglés fue publicado por la Food and Agriculture Organization of the United Nations de acuerdo con Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V (DVWK) en Roma en el año 2002. Su publicación original fue realizada en el año 1996. El objetivo de esta publicación fue dar a conocer una iniciativa para preparar guías específicas en relación con el paso de los peces, además aporta con recomendaciones técnicas para el diseño y evaluación del paso de los peces. Permite conocer propuestas para el dimensionamiento hidráulico adecuado de la estructura y verificar su funcionalidad, además hace hincapié en la importancia del monitoreo. (DVWK, 1996).

2.2.1.2. Guide passes à poissons

Este texto fue redactado por Aigoui y Dufour en el año 2008 en Francia. Esta guía constituye un instrumento de ayuda para diseñar un dispositivo de paso de peces eficaz que abarque las expectativas de abordar, ubicar y tratar con la continuidad

ecológica, además revisa los tipos de estructuras para el paso de peces, aborda el control de funcionamiento y eficiencia de la estructura (Aigoui et al., 2008).

2.2.1.3. Modelización hidráulica de paso para peces ante diferentes escenarios hidrodinámicos

Esta investigación es una tesis doctoral desarrollada en la Universidad de Valladolid en el año 2017 realizado por Juan Francisco Fuentes. Tiene por objetivo proponer y definir un marco práctico para el cálculo y modelamiento del nivel de agua en la escala de peces más común, además proporcionar una caracterización de la variabilidad para aumentar su eficiencia. El cuerpo principal de la tesis está basado en tres artículos publicados que comprenden el estudio del rendimiento hidráulico, además toma en cuenta las metodologías adecuadas, definiendo sus limitaciones (Fuentes, 2017)

2.2.1.4. Proyecto de paso para peces sobre el azud del puente del ferrocarril de Burgos (Río Arlanzón)

Esta investigación es un proyecto de grado para la obtención del título de Ingeniería Forestal y del Medio natural realizada en la Universidad de Valladolid por Raúl Del Olmo Carrasco en el año 2015. Tiene como objeto el diseño y presupuesto de obras necesarias para construir una escala de estanques sucesivos conectados por hendiduras vertical sobre el azud del puente del ferrocarril situado en el río Arlanzón, permitiendo el paso y migración de las diversas especies concurrentes en el río, además permite comunicar el nivel superior con el nivel inferior del agua en el azud evitando el confinamiento de las poblaciones ícticas. Se identificó alternativas desde la demolición del azud hasta el análisis de los tipos de escalas, la selección de la estructura antes mencionada toma en cuenta las condiciones del río, la estructura existente y la efectividad del ascenso de los peces (Del Olmo Carrasco, 2015).

2.2.1.5. Metodología para la evaluación de pasos para peces de estanques sucesivos

Esta investigación es una tesis para obtener el Máster en Investigación en Conservación y Uso Sostenible de los Sistemas Forestales en la Universidad de Valladolid en el año 2015 por Jorge Valbuena Castro. Los objetivos de la investigación es desarrollar una metodología técnica para evaluar el ascenso de las especies a través de la escala de estanques sucesivos, al mismo tiempo demostrar la aplicabilidad de la metodología a través de un caso práctico para evaluar su funcionalidad. La metodología aplicada toma en cuenta las capacidades natatorias similares de las especies y a su vez consideró exclusivamente el ascenso hacia aguas arriba. Es primordial considerar el emplazamiento de la estructura ya que esto puede ser un efecto perjudicial para que los peces encuentren la entrada a la escalera, reduciendo considerablemente los individuos capaces de entrar y superar la escala (Valbuena, 2015).

2.2.1.6. Evaluación de la efectividad de la escala de peces del Azud del río Ebro en Xerta (Tarragona)

Este informe fue realizado por la Confederación Hidrográfica del Ebro en el año 2010 y publicado por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino en el año 2011. Los objetivos del informe son determinar la composición de especies y la abundancia de la comunidad íctica aguas abajo del azud y evaluar la efectividad de la escala de peces mediante el monitoreo por vídeo. En síntesis, el paso de peces ubicado en medio del azud contiene 14 estanques sucesivos y el paso del agua de un estanque a otro es a través de rampas con un caudal variable que depende del caudal del río. El muestreo de la comunidad de peces fue mediante la pesca eléctrica sobre una barca neumática equipada en tramos de unos 500 m aguas abajo del azud en cuatro zonas representativas y en zonas de mayor profundidad se recurrió a la pesca con caña obteniendo datos cualitativos de la presencia de especies, que fueran capaces de ser notorios al otro método. Cada pez fue depositado en un contenedor de

aireación para más tarde registrar su longitud y peso para luego ser devuelto al río. La efectividad de la estructura se evaluó mediante grabaciones bajo el agua por medio del monitoreo del movimiento de la comunidad íctica a través de la estructura, con una cámara remota de alta sensibilidad modelo "Look-at". Además la adición de trampas en la salida de la escala de peces permitió obtener una cuantificación de las especies que utilizan la escala (Alonso & Aparicio, 2011).

2.2.1.7. Base de diseño de escaleras para peces

Esta investigación es una tesis para obtener el título de Ingeniero Civil opción hidráulica en la Universidad Central del Ecuador, realizada por Hugo Champutiz en el año 2013. El objetivo es crear una metodología de diseño basada en la revisión bibliográfica, la cual sea sencilla de utilizar y permita el adecuado dimensionamiento de las escaleras de peces satisfaciendo el tránsito libre y supervivencia de la ictiofauna a lo largo de ríos de montaña. En resumen, establece que las escaleras de peces fueron construidas primordialmente en América del Norte y Europa exclusivamente para especies salmónidas, sin embargo, para especies ciprínidos es posible adaptar los diseños tradicionales requiriendo caracterización de la especie. Debido a la falta de conocimiento del comportamiento migratorio de las especies en América del Sur hace imposible establecer guías de diseño para las escaleras de peces (Champutiz, 2013).

2.2.1.8. Aspects of Design and Monitoring of Nature-Like Fish Passes and Bottom Ramps

Esta investigación fue realizada por Ruey-wen Wang en el año 2008 en la Universidad Técnica de Múnich. El objetivo consiste en establecer modelos hidráulicos para mejorar los problemas de paso libre de los peces en diferentes condiciones de flujo y se compara con un modelo convencional. Además, analiza la tasa de energía disipada en términos cuantitativos para percibir la influencia en el rendimiento de los

peces. Sugiere principios de diseño análogos a la naturaleza y procedimientos operativos de monitoreo y como evaluar su efectividad. La construcción de una rampa sin vertedero, pero con rocas de perturbación proporciona óptimas condiciones de migración de la especie del río tanto con flujo medio y bajo flujo; no existen diferencias entre los parámetros hidráulicos ya que son amigables con los peces (Wang, 2008).

2.2.2. ESTADO DEL ARTE

En la siguiente tabla se describe las características de estudio, propósito y el resultado que se obtuvo en diferentes investigaciones sobre escaleras de peces.

Tabla 2

Estado del arte

Investigador(es)	Año, institución y localización	Características del estudio	Propósito	Resultados
Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau / Food and Agriculture Organization	1996/2002. DVWK/FAO. Roma	El objetivo principal de esta publicación fue brindar una guía de escaleras de peces aportando recomendaciones técnicas y de diseño.	Permite conocer los tipos de escaleras de peces con sus respectivas recomendaciones para su dimensionamiento basándose en diversos factores físicos e hidráulico y verificar su adecuado funcionamiento	Se presenta los diferentes tipos de diseños con su respectivo dimensionamiento considerando las diversas recomendaciones.
Aigoui Fabien, Dufour Michel, Isidoro Gregoire, Leblond Dominique, Albin Claire, Antonic Luka, Chapital Laura, Larinier Michel y Bruyn Bertrand	2008. Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales. Francia	Brinda características de diferentes peces, características geométricas de diseño de los diferentes tipos de escaleras, condiciones hidráulicas, mantenimiento, recomendaciones y restricciones.	Elabora un documento tipo guía para diseñar dispositivos eficaces y a su vez conservar la continuidad ecológica.	Genera una herramienta de apoyo para guiar órganos de contratación y les permite juzgar el desempeño de las distintas etapas del desarrollo de la estructura.

Investigador(es)	Año, institución y localización	Características del estudio	Propósito	Resultados
Francisco Javier Sanz y Andrés Martínez	2017. Universidad de Valladolid. España	Tesis doctoral que presenta metodologías adecuadas y define limitaciones para la escalera con escalones más común.	Proponer un método general para el cálculo de caudal y nivel de agua de la escalera de peces unificando las diversas fuentes bibliográficas.	Se expone la necesidad de adaptar ecuaciones clásicas de diseño para dimensionar adecuadamente la estructura bajo parámetros hidráulicos que comprendan su eficiencia. Permite la libre circulación de la fauna actica.
Raúl Del Olmo Carrasco	2015. Universidad de Valladolid. España	Tesis de grado donde se realiza el diseño y presupuesto de obras necesarias para la construcción de una escala de estanques verticales sucesivos con hendidura vertical.	Permitir el tránsito de las especies de peces situados en el sitio de estudio, facilitar la propagación y migración de dichas especies.	Diseño de una escalera de peces con estanques sucesivos conectados por hendiduras vertical sobre el azud del puente del ferrocarril situado en el río Arlanzón y el cálculo de los precios unitarios de la estructura. La visita de la población a observar la conservación de las especies.

Investigador(es)	Año, institución y localización	Características del estudio	Propósito	Resultados
Jorge Valbuena	2015. Universidad de Valladolid. España	Tesis doctoral que presenta la aplicación de una metodología a través de un caso práctico para evaluar la funcionalidad de una escalera de estanques sucesivos tomando en cuenta las capacidades natatorias de los peces.	Desarrollar una metodología capaz de determinar la funcionalidad de la escalera de estanques sucesivos e identificar sus problemas. Comparar dicha metodología con la metodología existente hasta la fecha.	La metodología desarrollada para la escalera presenta un funcionamiento favorable basada en una puntuación que analiza diversas variables. Aunque no garantiza que los peces circulen a través de la escalera ofrece condiciones hidráulicas que pueden ser superadas por las especies.
Miguel Alonso y Enric Aparicio	2011. Confederación del Hidrográfica del Ebro. España	El desarrollo del informe analiza la escala de peces situada en el margen derecho del azud del río Ebro	Determinar los tipos de especies y la abundancia de las especies aguas abajo del azud y evaluar mediante el monitoreo de peces por medio de video la efectividad de la escala de peces.	Existe una disminución de la comunidad íctica del río Ebro ya que los peces de menor tamaño utilizan únicamente la escalera para su descenso. La utilización de la escalera es baja debido a varios factores uno de ellos el flujo que circula por encima del Azud como un caudal de distracción.

Investigador(es)	Año, institución y localización	Características del estudio	Propósito	Resultados
Hugo Rodrigo Champutiz Tapia	2013. Universidad Central Ecuador. Quito.	Tesis de grado que desarrolla bases de diseño para escaleras de peces	Establecer una metodología de diseño basada en bibliografía técnica fiable que permita la supervivencia de la ictiofauna.	Concluye que la mayor cantidad de información y parámetros de diseño son para especies salmónidas, pero es posible adaptarlas para especies ciprínidos, también que debido a la falta de estudios en especies de América del Sur es imposible crear una guía de diseño para dicha zona.
Ruey-wen Wang	2008. Universidad Técnica de Múnich. Alemania	Analiza la energía disipada y su influencia en la eficiencia de la estructura (rampa).	Establecer modelos hidráulicos que mejoren el paso libre de los peces a condiciones diferentes de flujo.	Sugiere que los principios de diseño sean análogos a la naturaleza y un monitoreo para evaluar su efectividad.

Elaborado por: Barrera y Sanunga

2.2.3. ESTUDIOS DE IMPACTOS AMBIENTALES EN HIDROELÉCTRICAS DEL PAÍS

Basado en la información de los estudios ambientales realizados en obras de captación representativas para el país, se define algunos registros de ictiofauna que se encuentran en el transcurso del río, lo que nos permitirá saber el tipo de pez más representativo en el transcurso del río. Estos estudios toman en cuenta la ictiofauna y el efecto que se produce al construir dichas estructuras que son beneficiosas para el hombre y a su vez afectan al medio ambiente.

2.2.3.1. Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair

Según el estudio de impacto ambiental realizado por Efficãcitas Consultora Cía. Ltda. en el año 2009 establece que el tramo intervenido en el río Coca no constituye un hábitat de macroinvertebrados acuáticos, a diferencia que en el río Quijos (el cual se encuentra aguas arriba de la estructura) debido a la alta contaminación de sus aguas no hay peces por lo que no hay afectación ictiológica. Además, en los ramales que alimentan el río Quijos se presentaron peces (trucha) a los cuales no les afecta la realización de obras de aprovechamiento ya que esta especie migra a la parte alta de río (Efficãcitas Consultora Cía, 2009).

Existe información levantada mediante encuestas que se realizaron a los pobladores de las parroquias cercana a los ríos Sardina Grande, Río Oyacachi, Río Salado y Río Malo que reportaron presencia de trucha conocidas comúnmente como Arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) y sardinita (*Thoracocharax sp.*), siendo la trucha la única especie presente en estas aguas.

A continuación, la tabla 3 describe los sitios de pesca y las especies encontradas en la zona.

Tabla 3

Descripción de la zona de estudio e identificación de especies de la Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair

Ubicación	Descripción de la zona	Identificación de especie	
		Nombre común	Nombre científico
Río Cuyua	Aguas turbias con sedimentos en suspensión, corriente fuerte y pendiente pronunciada.	No se evidencio ninguna especie	
Río Atuntinahua	Agua correntosa con sedimento	No se menciona	
Río Guagrayacu	Lecho pedregoso con alto contenido de sedimento.	No se menciona	
Río Parada Larca	Río pedregoso con sedimentos y poco caudal.	No se evidencio ninguna especie	
Confluencia del río Quijos y río Sardina Grande	Aguas turbulentas con sedimentos.	Trucha	Oncorhynchus mykiss
Río Linares	Lecho con un buen caudal y sedimentos en suspensión.	No se menciona	
Puente del río Oyacachi del cantón Chaco	Poca vegetación, alto caudal.	Trucha	Oncorhynchus mykiss
		Sardinita	Thoracocharax sp
Río Salado	Lecho con alto contenido de sedimentos en suspensión.	Trucha	Oncorhynchus mykiss

Ubicación	Descripción de la zona	Identificación de especie	
		Nombre común	Nombre científico
Río Malo		Trucha	<i>Oncorhynchus mykiss</i>
		Sardinita	<i>Thoracocharax sp</i>

Fuente: Efficãcitas Consultora Cía (2009)

Elaborado por: Barrera y Sanunga

La trucha presenta un tamaño promedio de entre 30 a 40 cm de longitud total en ocasiones hasta 60 cm, la sardinita es de tamaño muy pequeño.

2.2.3.2. Central Hidroeléctrica Delsintanisagua

Según el estudio realizado se identificó cinco especies, divididas en cinco familias y tres órdenes siendo la trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*), la preñadilla (*Astroblepus sp.*) y corroncho (*Chaetostoma sp.*) (Chamba, 2015).

Debido a la presencia de las especies antes mencionadas se sugirió realizar una estructura hidráulica (escalera de peces) que permita el movimiento de los peces.

2.2.3.3. Central Hidroeléctrica Mazar

Según el estudio elaborado por Hidropaute S.A. se realizaron muestreos (en la época lluviosa como en la época seca) en los principales ríos y quebradas de la cuenca del río Paute, para determinar con gran precisión las especies presentes en la cuenca antes mencionada.

El estudio realizado en el área de la construcción de la hidroeléctrica Mazar con respecto a la ictiofauna se identificó las siguientes especies (Hidropaute S.A., 2006):

- Especie introducida: la trucha (*Oncorhynchus mykiss*) capturadas en los ríos Pulpito, Mazar, Collay y Quebrada Honda y las carpas (*Cyprinus carpio*) capturadas en la cola del embalse.
- Especie nativa: la preñadilla (*Astroblepus sp.*) que fueron capturadas en los ríos Pindilig, Mazar y Quebrada Honda.
- No se identificaron peces migratorias.

La tabla 4 describe las características de la zona y las especies encontradas en el área de estudio.

Tabla 4

Descripción de la zona de muestreo e identificación de especies en la Hidroeléctrica Mazar

Ubicación	Descripción de la zona	Identificación de especie	
		Nombre común	Nombre científico
Río Collay	Aguas turbias con piedras grandes, el río es profundo de forma encajonada.	Trucha	<i>Oncorhynchus mykiss</i>
Quebrada Honda	Aguas claras con materia orgánica, rocas, zona de rápidos y pozas.	Trucha	<i>Oncorhynchus mykiss</i>
		Preñadilla	<i>Astroblepus sp.</i>
Río Pindilig	Vegetación nativa, árboles frutales, pastos y cultivos, gran cantidad de sedimentos en el lecho.	Preñadilla	<i>Astroblepus sp.</i>

Ubicación	Descripción de la zona	Identificación de especie	
		Nombre común	Nombre científico
Río Mazar	Aguas claras con piedras grandes y medianas, zonas de rápidos y pozas. Árboles de aliso y eucalipto, sembríos	Carpa	Cyprinus carpio
		Preñadilla	Astroblepus sp.
Río Pulpito	Río caudaloso con rocas, corriente rápida, pozas. Bosques nativos	Trucha	Oncorhynchus mykiss

Fuente: Hidropaute S.A. (2006)

Elaborado por: Barrera y Sanunga

La preñadilla es una especie nativa remanente de los Andes ecuatorianos que tiene un tamaño que oscila entre los 10 y 30 cm de longitud total. Las truchas presentan crecimiento rápido, aunque su talla se relaciona con la velocidad y temperatura de las aguas (Hidropaute S.A., 2006).

2.2.3.4. Central Hidroeléctrica Minas-San Francisco

Según el estudio realizado por Enerjubones, el registro de peces se lo realizó in situ en las orillas de los cauces tanto aguas arriba como aguas abajo.

A continuación, en la tabla 5 se muestra los sitios de muestreo:

Tabla 5

Descripción de la zona de muestreo de la Hidroeléctrica Minas-San Francisco

Cuerpo Hídrico	Características del sitio de muestreo
Río Jubones (aguas abajo)	Aguas algo turbias con arena y rocas, afluente torrentoso con presencia de sólidos.
Río Jubones, aguas debajo de la interconexión	Aguas turbias con presencia de arena y rocas, el afluente es poco torrentoso.
Río Cune y Jubones	Aguas claras con presencia de arena y roca, el afluente torrentoso.
Río Jubones (aguas debajo de la interconexión y del poblado de Uzhcurrumi)	Aguas claras con presencia de arena y arcilla, el afluente es muy torrentoso.
Río Jubones (aguas abajo de la unión con el río San Francisco)	Aguas turbias con presencia de arena y roca, el afluente es torrentoso.
Río Jubones (aguas arriba de la unión con el río San Francisco)	Aguas turbias con presencia de arena y roca, el afluente es torrentoso.
Río San Francisco	Aguas turbias con presencia de arena y roca, el afluente es torrentoso.

Fuente: Enerjubones (2011)

Elaborado por: Barrera y Sanunga

Las especies que se detallan a continuación en la tabla 6, se encontraron en los cauces principales, remansos principales y secundarios:

Tabla 6*Identificación de especies presentes en la Hidroeléctrica Minas-San Francisco*

Orden	Familia	Especie
Characiformes	Characidae	Rhoadsia altipinna
	Bryconidae	Brycon sp
Siluriformes	Astroblepidae	Astroblepus sp.
	Pimelodidae	Rhandia cf. wagneri
	Loricaridae	Hypostominae sp
Cyprinodontiformes	Poeciliidae	Pseudopoecilia fría
Perciformes	Cichlidae	Aequidens rivulatus

Fuente: Enerjubones (2011)

Elaborado por: Barrera y Sanunga

2.2.3.5. Central Hidroeléctrica Paute-Sopladora

En el estudio realizado para el proyecto Hidroeléctrico Paute-Sopladora se realizaron muestreos antes y después de la descarga de la central Molino sobre el río Paute, antes y después de la desembocadura del río Cardenillo Grande en el cauce principal del río Paute, antes y después del río Cardenillo Chico sobre el río Paute donde está ubicada la Descarga del Proyecto Paute-Sopladora.

La tabla 7, presenta la descripción de los sitios de monitoreo.

Tabla 7

Descripción de los sitios de monitoreo de la Hidroeléctrica Paute-Sopladora

Sitio de muestreo	Descripción
Río Paute antes de la descarga Central Molino	Aguas turbias, velocidad de la corriente muy rápida, sustrato de rocas medianas y pequeñas.
Río Paute después de la descarga Central Molino	Aguas turbias, la velocidad de la corriente es muy rápida, sustrato de rocas.
Río Paute antes de la confluencia del río Cardenillo Grande	Antes de la confluencia con el río Cardenillo las aguas son muy turbias, la velocidad de la corriente muy rápida y el sustrato de rocas y piedras. En el río Cardenillo el agua es clara, sustrato de piedra.
Río Paute después de la confluencia del río Cardenillo Grande	El sustrato contiene piedra.
Río Paute antes de la confluencia del río Cardenillo Chico (sitio descarga)	Aguas muy turbias, el afluente es torrentoso, sustrato que contiene rocas, cauce del río sinuoso.
Río Paute después confluencia Cardenillo Chico (sitio descarga)	Aguas turbias, la velocidad de la corriente es muy rápida.

Fuente: Hidropaute S.A. (2007)

Elaborado por: Barrera y Sanunga

Los ejemplares capturados fueron localizados en los remansos del cauce principal y en el fondo de la corriente. A continuación, la tabla 8 presenta las especies muestreadas:

Tabla 8

Identificación de las especies en la Hidroeléctrica Paute-Sopladora

Hábitat	Especie		
	Nombre Vulgar	Nombre científico	Tamaño
Remanso	Preñadilla / Bagre	Astroblepus sp.	15.5 cm a 25.5 cm
Fondo de la corriente			

Fuente: Hidropaute S.A. (2007)

Elaborado por: Barrera y Sanunga

El estudio consideró que la gran cantidad de sedimentos e irregularidad de los caudales de la zona influyeron en el desplazamiento de los peces sábalo y raspabalsa.

2.2.3.6. Central Hidroeléctrica Manduriacu

El análisis de la hidroeléctrica Manduriacu expresó que uno de los impactos ambientales más visible en el proyecto fue la pérdida masiva de peces, lo cual se produce por el lavado del embalse (procedimiento que se realiza dos o tres veces al año por acumulación de sedimentos). Para disminuir el daño se preveía construir una estructura hidráulica (ascensores de peces) para facilitar la transferencia de las especies existentes en la zona del proyecto.

Según el estudio ambiental realizado por el Consorcio TCA (Tractebel Caminosca Asociados) a la hidroeléctrica, el monitoreo de las especies se realizó aguas arriba y debajo de la ubicación del embalse.

La tabla 9, presenta la descripción del monitoreo de las especies (peces) presentes en la zona de estudio.

Tabla 9
Especies encontradas en la zona de estudio

Orden	Familia	Especie	Nombre común
Characiformes	Characidae	Brycon dentex	Sábalo
		Brycon sp.	Sábalo
		Bryconamericus caucanus	Sardina
		Rhoadsia minor	Doradillo
Mugiliformes	Mugilidae	Agonostomus monticola	Lisa
Perciformes	Cichlidae	Aequidens coeruleopunctatus	Vieja
		Andinoacara rivulatus	Vieja
		Cichlasoma festae	Vieja
Siluriformes	Astroblepidae	Astroblepus	Preñadilla
	Heptapteridae	Pimelodella modestus	Barbudito
	Loricaridae	Chaetostoma aequinoctiale	Guaña

Fuente: Tractebel Caminosca Asociados (2011)

Elaborado por: Barrera y Sanunga

2.2.3.7. Central Hidroeléctrica Normandía

Según el monitoreo biótico realizado de la ictiofauna en el área de la hidroeléctrica Normandía presenta un análisis de las especies de ictiofauna presentes in situ. Dicho monitoreo de la ictiofauna se realizó en cuatro (4) estaciones a lo largo del río Upano (Ecotono Consultores, 2018).

La tabla 10, presenta la descripción del hábitat en la zona de muestreo y el monitoreo de las especies (peces) presentes en la zona de estudio.

Tabla 10

Descripción del hábitat en la zona de muestreo e identificación de las especies de la Hidroeléctrica Normandía

Ubicación	Descripción del hábitat	Taxonomía de las especies		
		Orden	Orden y familia	Especies
Río Upano (aguas arriba - Zuñac)	Aguas turbias con presencia de rocas, cantos rodados, arena, troncos y hojarasca. Presenta una frecuencia alta de rápidos.	Siluriformes	Loricaridae	Andeancistrus platycephalus
			Astroblepidae	Astroblepus sp.
Río Upano (Captación)	Aguas claras, presencia de rocas, cantos rodados, arena, troncos y hojarasca. Presenta una frecuencia alta de rápidos.	Characiformes	Characidae	Creagrutus muelleri
		Siluriformes	Loricaridae	Andeancistrus platycephalus
		Salmoniformes	Salmonidae	Oncorhynchus mikiss
Río Upano (Sector casa de máquinas)	Aguas turbias con presencia de rocas, cantos rodados, arena, troncos y hojarasca. Presenta una frecuencia alta de rápidos.	Characiformes	Characidae	Creagrutus muelleri
		Siluriformes	Astroblepidae	Astroblepus sp.
			Loricaridae	Andeancistrus platycephalus
Salmoniformes	Salmonidae	Oncorhynchus mikiss		

Ubicación	Descripción del hábitat	Taxonomía de las especies		
		Orden	Orden y familia	Especies
Río Upano (9 de octubre)	Aguas turbias con presencia de rocas, cantos rodados, arena, troncos y hojarasca. Presenta una frecuencia alta de rápidos.	Characiformes	Characidae	Creagrutus muelleri
		Siluriformes	Astroblepidae	Astroblepus sp.
			Loricaridae	Lipoptericthys carrioni
		Salmoniformes	Salmonidae	Oncorhynchus mikiss

Fuente: Ecotono Consultores (2018)

Elaborado por: Barrera y Sanunga

2.2.4. ESPECIES OBTENIDAS DE LOS ESTUDIOS AMBIENTALES

En la siguiente tabla se describe las especies encontradas en los diferentes proyectos hidroeléctricos del país.

Tabla 11

Resumen de las especies basado en los estudios ambientales de las centrales hidroeléctricas

Ubicación	Identificación de especie		Características	
	Nombre común	Nombre científico	Talla máxima [mm]	Temperatura del agua optima [°]
Coca Codo Sinclair, Delsintanisagua, Mazar, Normandía	Trucha	Oncorhynchus mykiss	750 - 1200	21

Ubicación	Identificación de especie		Características	
	Nombre común	Nombre científico	Talla máxima [mm]	Temperatura del agua óptima [°]
Coca Codo Sinclair	Sardinita	Thoracocharax sp	670	
Delsintanisagua, Mazar, Minas San Francisco, Paute Sopladora, Manduriacu, Normandía	Preñadilla	Astroblepus sp.	40-100	
Mazar	Carpa	Cyprinus carpio	600 -650	
Minas San Francisco	Sabaleta	Rhoadsia altipinna	90-170	22-25
Minas San Francisco, Manduriacu	Sábalo	Brycon sp	168-340	22-26
Minas San Francisco	Barbudo / bagre	Rhandia cf. wagneri	400	
Minas San Francisco	Raspabalsa	Hypostominae sp	280-362	22-28
Minas San Francisco	Camotillo	Pseudopoecilia fría	35-52	
Manduriacu	Sardina	Bryconamericus caucanus	83	20-27
Manduriacu	Doradillo	Rhoadsia minor	104	

Ubicación	Identificación de especie		Características	
	Nombre común	Nombre científico	Talla máxima [mm]	Temperatura del agua optima [°]
Manduriacu	Lisa	Agonostomus monticola	360	20-31
Manduriacu	Vieja azul	Andinoacara rivulatus	200	20-24
Manduriacu	Vieja roja	Cichlasoma festae	400	
Manduriacu	Barbudito	Pimelodella modestus	121-200	
Manduriacu	Guaña/Carachama	Chaetostoma aequinoctiale	720	
Normandía	Carachama	Andeancistrus platycephalus	145	
Normandía	Sardina	Creagrutus muelleri	108	
Normandía	Carachama	Lipoptericthys carrioni	780	
Delsintanisagua	Corroncho	Chaetostoma sp	44-71	

Fuente: Jiménez et al. (2015), Froese & Pauly (2019)

Elaborado por: Barrera y Sanunga

CAPITULO 3

En el presente capítulo, se describirá los diferentes factores y condiciones que intervienen en la implantación de una escalera de peces y las escaleras que pueden tener una mayor adaptación a las condiciones de los ríos de nuestro país, lo que permitirá realizar el correcto diseño de la estructura mencionada.

METODOLOGÍA

2.3. FACTORES FÍSICOS E HIDRÁULICOS QUE INTERVIENE EN LA IMPLEMENTACIÓN DE ESCALERAS DE PECES

Para que una escalera de peces sea efectiva se debe considerar características hidráulicas y factores biológicos. Uno de los factores biológicos a tomar en cuenta es la velocidad de natación de los peces que está relacionada con la longitud corporal (Hammer, 1995) y factores físicos como la temperatura del agua (Myrick & Cech, 2000). Las condiciones hidráulicas en la escalera deben permitir que los peces más débiles sean capaces de atravesar la estructura (Odeh et al., 2002).

Para la implantación de una escala de peces existen varias condiciones, las cuales van a influir directamente en la eficiencia de la estructura. Dichas condiciones no solo pasan por temas ingenieriles o de terreno sino también biológicos, en este último caso no se posee la suficiente información por lo cual es difícil traducirlos en criterios de dimensionamiento (Pena, 2004).

Los factores para considerar para una implantación son los siguientes:

2.3.1. Biológicos:

Existen especies migratorias en los ríos o cursos de agua, mismas que poseen ciclos migratorios y estacionarios, también tienen capacidades natatorias y de salto las cuales dependen exclusivamente del tipo de especie que sea (Pena, 2004). Además, se debe considerar la especie objetivo, período de migración en el sitio de estudio, profundidad mínima a la que debe llegar el pez, distancia máxima recorrida y distintos ciclos biológicos (Rojas & Tarambis, 2012).

2.3.2. Hidrológicos:

Los cauces de agua o ríos tienen niveles de agua, mismos que variarán ante los cambios de las estaciones climáticas (Pena,2004). Se debe tomar en cuenta las características hidrológicas de la cuenca, uso de los recursos hídricos y mantenimiento de los caudales ecológicos (Rojas & Tarambis, 2012).

2.3.3. Hidráulicos:

Los factores hidráulicos por considerar son la velocidad del flujo, las distintas variaciones de calado en el recorrido, la relación entre caudal y calado, turbulencias, pendientes y la disipación de energía que la estructura sea capaz de liberar (Pena,2004).

2.3.4. Topográficos:

Se debe tomar en cuenta las condiciones tanto de entrada como de salida de la escala de peces y la batimetría del fondo del río (Pena,2004) y la erosión local en el pie del dispositivo (Rojas & Tarambis, 2012).

2.3.5. Gestión del agua:

No se puede pasar por alto la importancia del control del uso de los recursos hídricos, el cuidado del caudal ecológico correspondiente y gestión ambiental que se lleve a cabo en el río (Pena,2004).

2.4. ESCALERAS DE PECES ADAPTABLES A LAS CONDICIONES MÁS PROBABLES DEL ECUADOR

En Sudamérica los pasos de transferencias o también llamados escaleras de peces construidos son muy pocos y muchas de las represas carecen de ellas debido a que no se conoce la efectividad que se obtiene al construir la estructura que permita el desplazamiento de los peces. Los diferentes sistemas construidos en Sudamérica son los de tipo artesa ya que han tenido mayor aceptación debido a que replican los sistemas diseñados para el desplazamiento de los salmónidos y clupéidos (Baigún, Oldani, & Van Damme, 2011).

Para tomar referencia de América del Sur, en Brasil se han construido estos sistemas de transferencia sin aun conocer la eficiencia de la estructura para la conservación de las especies acuáticas. Para la selección de una escalera de peces depende del tipo de especies (migradores y nativos) que sean predominantes en un gran porcentaje (Baigún et al., 2011).

En los sistemas de transferencias existentes en Brasil identificaron que hay una limitación de uso del sistema por parte de las especies migratorias lo que se atribuye a diversos factores como la velocidad y temperatura del agua, turbulencia, habilidad de natación, entre otros. Es decir que se puede hacer el diseño selectivamente para las especies analizadas mediante un estudio biológico y de tal manera obtener la especie que predomine en el sitio (Baigún et al., 2011).

A continuación, se presenta una tabla que indica los diferentes sistemas de escaleras de peces implantados en los ríos de América del Sur, lo cual nos permite tener una idea más clara y contribuir en la selección de los tipos de sistemas del proyecto:

Tabla 12

Comparación de diferentes sistemas de paso instalados en los ríos de América del Sur.

Sistema	Ventajas	Desventajas	Ejemplos
Ranuras verticales ("vertical slots")	Permite operar con diferentes niveles de agua	Ofrece dificultades de paso para especies de gran tamaño. Carece de áreas de descanso para los peces	Represa de lagarpava (río Grande, Brasil)
Escaleras (escalones-tanques) ("pool and weir")	Apropiadas para represas de baja altura y gran flexibilidad de diseños.	Alta selectividad de especies. Sensible a los cambios de caudal. Poca efectividad para especies de fondo.	Represa de Lajeado (río Tocantins, Brasil) Represa de Salta Morais (río Tijuco, cuenca alta del río Paraná, Brasil).
Ascensores	El costo es independiente de la altura de la represa. Requiere poco espacio para su instalación. Poco sensible a las variaciones de nivel del embalse.	Costo elevado de construcción, operación y manutención. Genera estrés en los peces y mortandad por aglomeración. El número de peces transferidos depende del volumen del ascensor y del tiempo del ciclo.	Represa Sergio Motta (río Paraná, Brasil) Represa de Funil (río Grande, Brasil) Yacyreta (río Paraná, Argentina-Paraguay) Represa Santa Clara (río Mucuri).

Sistema	Ventajas	Desventajas	Ejemplos
Esclusas ("fish locks")	Diseño flexible que puede ser adaptado a distintos tipos de represas hidroeléctricas.	Baja capacidad de transferencia. El número de peces transferido depende del número de ciclos diarios. Durante la fase del llenado, el flujo de atracción se reduce o se elimina.	Represa de Salto Grande (río Uruguay, Argentina-Uruguay)
Sistemas de by-pass (ríos artificiales)	Alta capacidad de transferencia. Permite simular las condiciones naturales del río. Amplio espectro de velocidades de agua. Utilizables para migraciones descendentes. Proporcionan hábitats para especies residentes.	Requieren de un amplio espacio para su instalación cuando la altura de la represa es considerable debido a su baja pendiente. Susceptible a variaciones del nivel de agua en el reservorio. Riesgo de introducción de especies no-deseadas.	Canal de Piracema, Represa Itaipú, río Paraná (Paraguay-Brasil)

Fuente: Baigún et al. (2011)

Para la selección de los dos tipos de escaleras de peces en el trabajo de investigación, se consideró que se adapten a las condiciones existentes en el Ecuador tomando en cuenta los ríos y especies existentes.

Con respecto a los ríos del Ecuador de acuerdo con los anuarios hidrológicos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI), se puede

apreciar que los caudales diarios varían a lo largo de todo el año (figura 11 y 12), teniendo caudales máximos muy por encima de los caudales mínimos. Esta fluctuación de caudal puede ser controlada con la construcción de obras de toma, donde el flujo natural de agua es obstruido por una presa para crear una laguna artificial que permitirá mantener un caudal estable a lo largo del año. La altura de estas presas es el principal factor que determinará qué tipo de escalera se debe implementar.

CAUDALES MEDIOS DIARIOS (m³/s)

2013

H0170		GUAYLLABAMBA AJ BLANCO											
DIA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
1	158.195 *	86.893 *	401.105 *	192.247 *	176.958 *	260.896 *	178.315 *	91.154 *	78.579 *	81.664 *	98.786 *	121.801 *	
2	139.000 *	76.565 *	377.450 *	227.120 *	163.476 *	242.254 *	167.469 *	81.664 *	62.919 *	74.534 *	137.729 *	118.491 *	
3	196.499 *	147.176 *	354.357 *	202.212 *	147.815 *	227.103 *	154.263 *	74.534 *	60.101 *	66.695 *	119.450 *	98.786 *	
4	159.500 *	105.501 *	299.978 *	168.851 *	131.489 *	215.237 *	178.315 *	67.663 *	52.876 *	62.893 *	102.130 *	89.019 *	
5	293.228 *	90.100 *	404.787 *	149.086 *	120.626 *	196.473 *	167.469 *	58.269 *	52.055 *	57.370 *	156.873 *	79.599 *	
6	363.968 *	350.814 *	382.852 *	131.489 *	234.631 *	182.464 *	154.263 *	121.801 *	61.043 *	66.713 *	142.716 *	71.561 *	
7	240.758 *	333.442 *	347.296 *	301.387 *	209.394 *	166.146 *	141.446 *	111.240 *	63.843 *	61.026 *	130.271 *	106.650 *	
8	210.863 *	283.367 *	316.425 *	259.331 *	190.821 *	151.670 *	127.842 *	100.998 *	52.876 *	61.043 *	117.056 *	94.395 *	
9	221.165 *	242.305 *	421.364 *	234.674 *	179.698 *	142.707 *	114.714 *	126.615 *	70.636 *	103.245 *	104.386 *	86.876 *	
10	203.638 *	213.785 *	200.743 *	267.239 *	151.687 *	131.489 *	167.469 *	114.740 *	62.893 *	94.395 *	95.475 *	78.588 *	
11	185.229 *	936.198 *	178.315 *	860.583 *	132.734 *	151.670 *	150.382 *	105.501 *	58.269 *	83.730 *	200.743 *	102.130 *	
12	166.146 *	901.411 *	159.500 *	408.780 *	118.249 *	142.707 *	190.821 *	92.217 *	60.101 *	75.545 *	183.855 *	90.074 *	
13	146.553 *	874.386 *	135.188 *	548.342 *	164.824 *	196.473 *	175.610 *	80.645 *	53.757 *	73.549 *	167.469 *	83.730 *	
14	126.641 *	830.878 *	125.414 *	431.026 *	152.975 *	185.221 *	162.136 *	167.469 *	66.695 *	140.486 *	150.382 *	73.549 *	
15	105.570 *	783.413 *	112.415 *	395.626 *	136.467 *	174.236 *	259.331 *	151.670 *	64.785 *	60.101 *	138.939 *	397.579 *	
16	388.306 *	718.783 *	121.801 *	359.603 *	361.868 *	159.500 *	236.178 *	138.957 *	80.645 *	77.568 *	124.195 *	356.190 *	
17	554.754 *	660.601 *	108.932 *	330.011 *	275.208 *	149.086 *	221.140 *	129.043 *	73.549 *	162.698 *	112.389 *	336.873 *	
18	480.298 *	619.168 *	96.608 *	302.994 *	242.279 *	135.206 *	203.638 *	114.714 *	63.843 *	242.254 *	104.386 *	364.919 *	
19	288.526 *	589.230 *	338.610 *	417.820 *	218.201 *	120.600 *	185.221 *	105.501 *	56.445 *	219.696 *	90.074 *	349.051 *	
20	183.890 *	551.600 *	313.028 *	386.499 *	195.108 *	108.932 *	172.862 *	95.493 *	51.994 *	200.743 *	140.201 *	333.425 *	
21	147.850 *	562.403 *	276.807 *	370.277 *	175.610 *	96.608 *	158.195 *	85.830 *	55.667 *	181.072 *	125.414 *	114.740 *	
22	126.641 *	582.904 *	254.682 *	347.314 *	155.576 *	145.266 *	154.323 *	77.568 *	59.176 *	167.469 *	113.564 *	101.033 *	
23	106.650 *	553.674 *	231.623 *	321.463 *	137.729 *	133.961 *	147.798 *	67.663 *	60.136 *	156.873 *	97.688 *	80.645 *	
24	91.197 *	508.862 *	246.877 *	276.807 *	121.801 *	98.803 *	133.961 *	58.269 *	58.269 *	146.528 *	152.975 *	68.683 *	
25	78.588 *	481.059 *	867.074 *	340.382 *	365.316 *	218.711 *	120.626 *	73.549 *	51.502 *	137.677 *	140.201 *	78.691 *	
26	116.045 *	453.834 *	673.392 *	264.068 *	272.036 *	153.355 *	107.783 *	62.919 *	61.968 *	125.414 *	124.195 *	121.801 *	
27	98.786 *	421.537 *	392.489 *	239.203 *	243.801 *	249.997 *	96.573 *	52.876 *	60.101 *	114.714 *	130.262 *	107.783 *	
28	81.690 *	395.600 *	479.719 *	225.616 *	227.276 *	228.607 *	121.801 *	89.019 *	56.445 *	105.501 *	121.801 *	96.573 *	
29	78.691 *		368.505 *	207.951 *	227.103 *	209.394 *	111.240 *	79.599 *	51.994 *	94.395 *	102.130 *	87.939 *	
30	87.939 *		302.994 *	193.639 *	209.394 *	193.639 *	99.900 *	69.608 *	49.393 *	119.424 *	90.074 *	78.588 *	
31	76.565 *		257.776 *		190.856 *		86.893 *	61.968 *		107.800 *		172.576 *	
Caudal Max.	612.660 *	948.704 *	874.377 *	984.156 *	393.759 *	357.823 *	264.050 *	170.157 *	83.730 *	257.741 *	203.604 *	415.919 *	
Día	17	11	25	11	16	25	15	14	16	17	11	15	
Hora	7	7	17	7	7	7	7	7	7	17	7	7	
Caudal Mín.	71.561 *	73.532 *	92.217 *	129.035 *	114.705 *	36.316 *	83.730 *	51.113 *	41.053 *	54.639 *	87.930 *	63.835 *	
Día	29	2	18	6	12	26	31	27	25	5	30	24	
Hora	7	17	17	17	17	7	17	17	17	17	17	17	
Caudal Medio	190.431	476.982	308.003	312.055	194.549	172.280	158.386	93.831	60.419	113.639	127.194	146.527	

NOTA: *CALCULADO CON DATOS LIMNIMÉTRICOS

Figura 11 Caudales Medios Diarios (m³/s) de la cuenca GUAYLLABAMBA AJ BLANCO - datos Limnimétricos

Fuente: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (2013)

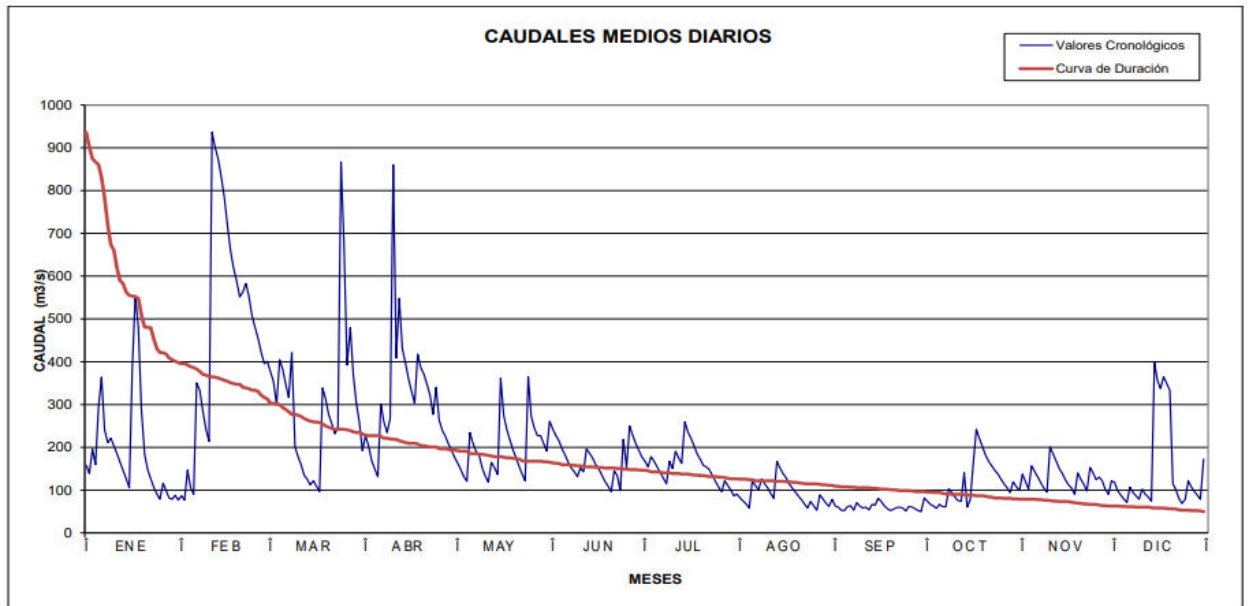


Figura 12 Caudales Medios Diarios (m³/s) de la cuenca GUAYLLABAMBA AJ BLANCO

Fuente: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (2013)

Si bien es cierto que en el país existen hidroeléctricas de gran tamaño, el Plan Maestro de Electricidad del Ecuador indica que la mayor cantidad de hidroeléctricas en el país, ya sean existentes o por construir, poseen obras de toma con presas de tamaños inferiores a los 5 metros, haciendo más necesario un software que facilite el diseño de las escaleras de peces adaptables para hidroeléctricas más pequeñas.

Partiendo de lo dicho anteriormente, se evaluarán los tipos de escaleras de peces según la diferencia de altura recomendable, misma que viene a ser la altura de la presa. En la tabla siguiente se describe el tipo de escalera recomendable según la altura de la presa:

Tabla 13

Alturas de las presas y escaleras recomendables para su implementación.

Tipo	Altura de presa recomendable	Evaluación
Ascensores de peces	Mayores a 8 metros	No recomendable
Esclusa de peces	Mayores a 8 metros	No recomendable
Escalera artesa	Inferiores a 5 metros	Recomendable
Escalera de hendidura vertical	Inferiores a 5 metros	Recomendable
Escalera ralentizadora	Entre 2 y 4 metros	Poco recomendable
Rio artificial	Inferiores a 3 metros	Poco recomendable

Elaborado por: Barrera y Sanunga

Otro factor importante para la elección del tipo de estructura de transferencia de peces es el tipo de especies que habitan en los ríos. El Ecuador posee una gran variedad de especies acuáticas donde predominan la trucha, sardinita y preñadilla entre otras especies. Las capacidades natatorias de las especies ya mencionadas están ligadas estrechamente a su tamaño más no a su especie, por lo tanto, no requieren de algún tipo especial de escalera de peces, sino dependerán más de las dimensiones y condiciones tales como: velocidad, turbulencia y corriente de atracción que estas estructuras generen.

Una vez analizada la información recopilada de los tipos de escaleras, las que mejor se adaptan a las condiciones particulares presentes en el Ecuador son del tipo de hendidura vertical y del tipo estanques sucesivos.

2.4.1. UBICACIÓN OPTIMA

Para conocer la ubicación ideal de una escalera es indispensable conocer todas las condiciones hidráulicas y de flujo, topográficos y documentación del proyecto, por este motivo solamente es posible dar ciertas recomendaciones y aspectos importantes para su correcta ubicación (Schmutz & Mielach, 2013).

Cuando un río posee un ancho superior a los 100 metros, se deberán colocar dos escaleras de peces, una de cada lado de la barrera, aumentando la perceptibilidad de esta estructura para las especies acuáticas (Schmutz & Mielach, 2013).

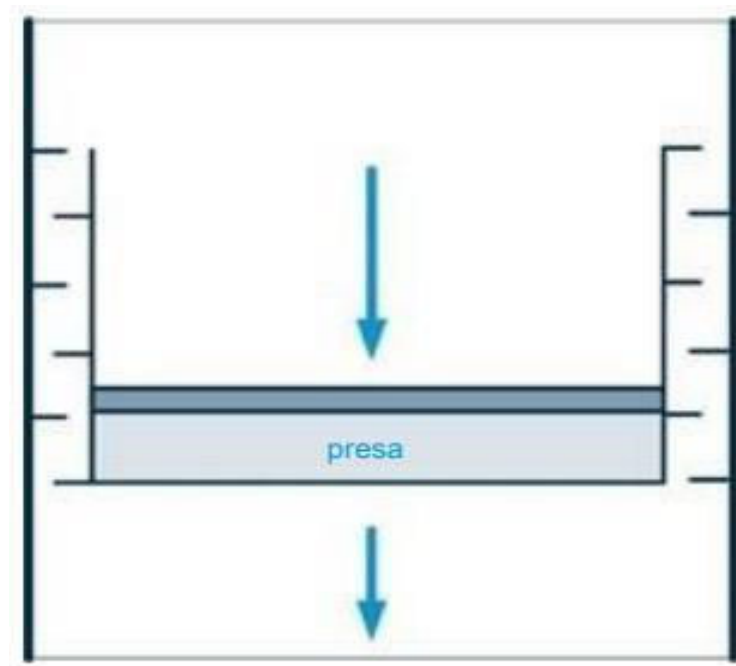


Figura 13 Ubicación de los pasos de peces si ambos lados son iguales o para presas grandes

Fuente: Schmutz & Mielach (2013)

Si la barrera es diagonal, la escalera de peces deberá estar colocada en la orilla, al final del ángulo puntiagudo que forma la barrera con la orilla (Schmutz & Mielach, 2013).

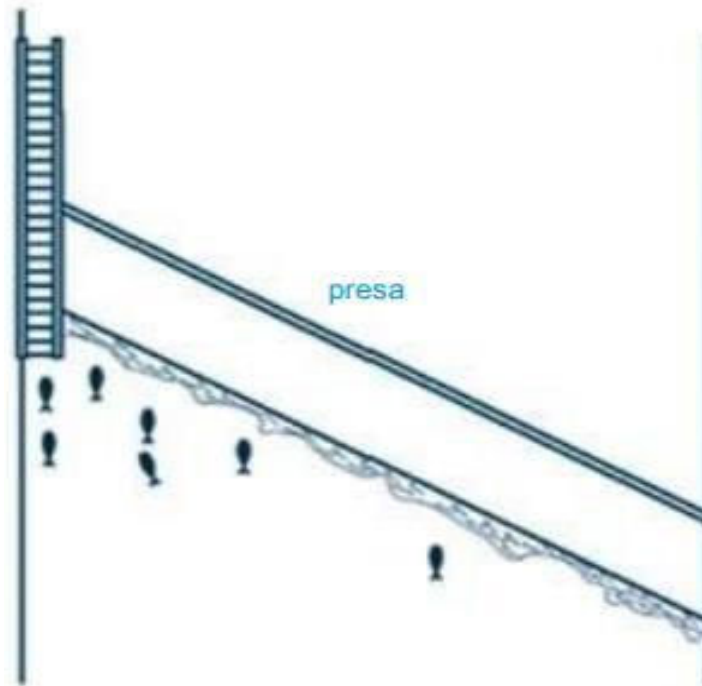


Figura 14 Plano esquemático que ilustra la instalación de un paso de peces de manera correcta.

Fuente: Schmutz & Mielach (2013)

En algunas ocasiones estas barreras o presas pueden cerrarse en el centro del río, en esta situación nuestra estructura deberá estar colocada donde los peces tienden a aglomerarse (Schmutz & Mielach, 2013).

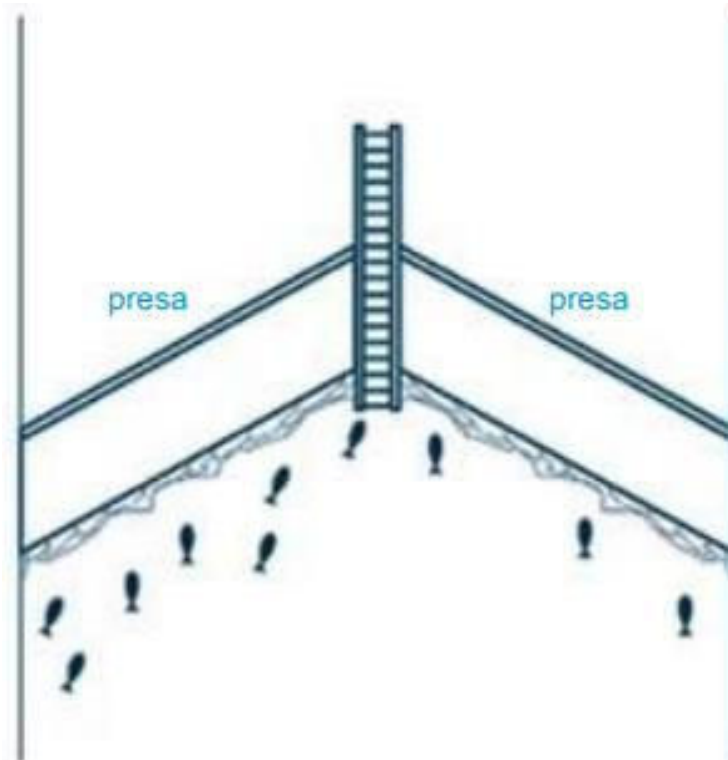


Figura 15 Plano esquemático que ilustran la instalación de un paso de peces de manera correcta, pero con problemas de acceso y mantenimiento.

Fuente: Schmutz & Mielach (2013)

Si la barrera posee una casa de máquinas, la corriente llevará a los peces hacia las turbinas, por lo tanto, la escalera debe estar ubicada entre la costa y la casa de máquinas (Schmutz & Mielach, 2013).

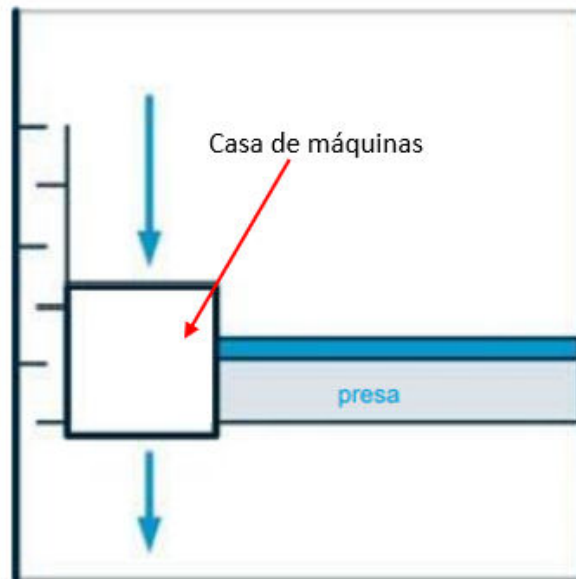


Figura 16 Ubicación de la escalera de peces cerca de la casa de máquinas

Fuente: Schmutz & Mielach (2013)

La ubicación más apropiada para una escalera de peces en las centrales hidroeléctricas es generalmente paralela a la dirección de flujo y en las orillas del río (DVWK, 1996).

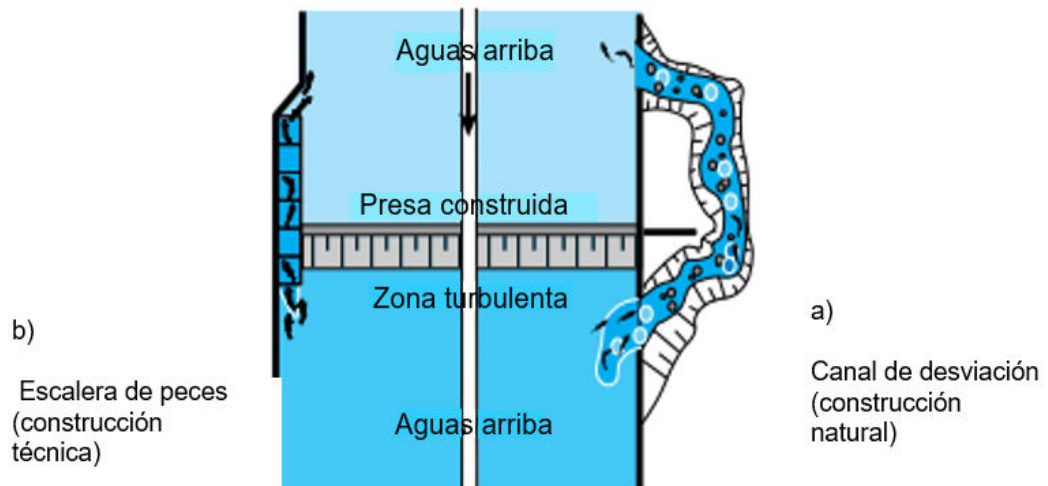


Figura 17 Posición óptima de un canal de derivación y b) posición óptima de un paso de peces técnico.

Fuente: DVWK (1996)

2.4.2. CONDICIONES DE ENTRADA Y SALIDA

2.4.2.1. Entrada de la escalera

Para un dispositivo de franqueo la entrada, es decir, la zona más baja de toda la escalera de peces es lo más importante en toda la estructura ya que de esto dependerá todo el funcionamiento de este, por ende, su ubicación será de vital importancia. Las otras dos partes que forman el dispositivo son la escalera de peces y la salida o también llamada entrada del caudal (Clay, 1995).

La entrada por lo general se situará en dirección paralela a la dirección de flujo del río, evitando que los peces no realicen cambios bruscos de dirección, si la entrada está demasiado lejos aguas abajo los peces tendrán dificultades de encontrar dicha entrada, la cual debe ser perceptible para los peces por el flujo de agua (DVWK, 1996).

La atracción de los peces hacia los dispositivos de entrada se plantea de acuerdo con las especies que habitan en el río (Elvira et al., 1995). En nuestro país las especies de peces que predominan en los ríos son los ciprínidos, salmónidos, siluriformes y characiformes, para los cuales se necesita colocar la entrada aguas abajo, donde el agua es menos turbulenta, dando una mayor importancia a la comodidad del pez para ingresar a la escalera que a la corriente de atracción a éste. (Mallen-Cooper y Stuart, 2007; Silva et al., 2009).

El flujo de atracción es el responsable de la atracción del pez hacia la estructura de franqueo, específicamente hacia la entrada de este. La fauna acuática del río deberá ser capaz de encontrar la entrada a la escalera de peces a la mayor distancia posible, esto gracias al flujo de agua producido por el efecto llamada (Clay, 1995).

La utilización de un canal de flujo denominado “bypass” desde la cabecera de la estructura transversal hasta la entrada de la escalera de peces permitirá el incremento en la atracción del flujo en la entrada de la escalera, otro dispositivo que puede ayudar a atraer a los peces es una antecámara que se localizaría en la entrada de la escalera e incluiría la salida del canal del flujo (DVWK, 1996). A continuación, en la figura 16 se observa la descarga a través de un canal de flujo.

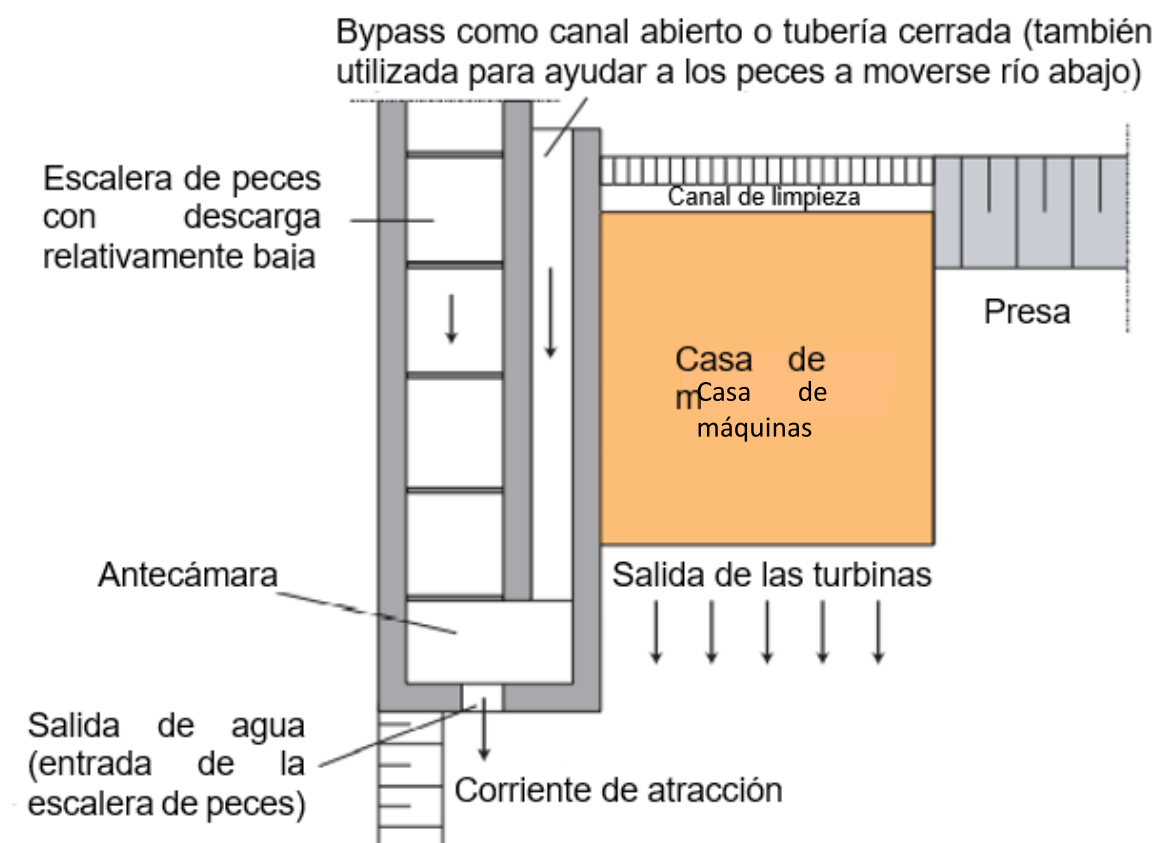


Figura 18 Descarga adicional a través de un bypass en una antecámara para aumentar la atracción del flujo en la entrada de la escalera de peces.

Fuente: DVWK (1996)

2.4.2.1.1. Condiciones por cumplirse en la entrada

- La entrada debe ser fácil de ser encontrada por la especie objetivo.
- Ubicación y orientación del dispositivo, paralelo al río o aguas abajo del mismo.
- El canal de entrada debe cumplir con las siguientes condiciones de dimensionamiento (Larinier, 1998):
 - profundidad mayor a 1 metro
 - Superficie mínima mayor a 3 metros cuadrados
- La profundidad del canal será calculada con la relación $1/3$ o $1/2$ de h_r , siendo h_r la diferencia de altura de los niveles de aguas arriba y aguas abajo (DVWK, 1996).
- Longitud total del canal, debe garantizar la continuidad del río aguas abajo, debe estar entre 7 a 10 veces de h_r (DVWK, 1996).
- El número de Froude debe ser menor a 1 para evitar resaltos hidráulicos en el canal.
- Emplear dispositivos de guía como barreras de tipo física, eléctricas, sonoras y lumínicas.

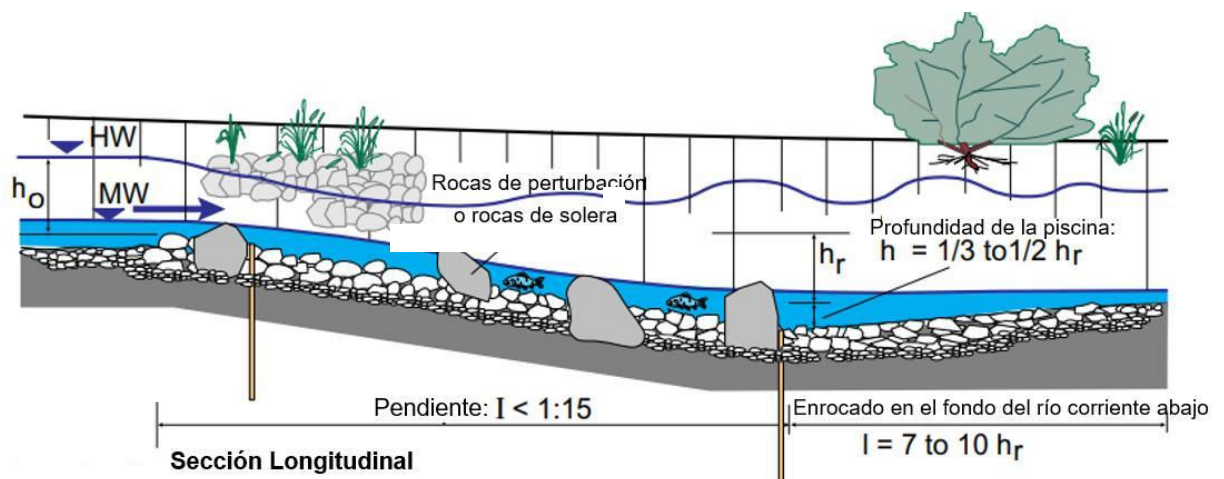


Figura 19 Dimensionamiento del canal

Fuente: DVWK (1996)

2.4.2.2. Condiciones de Salida

Para la salida de la estructura de peces hay que tomar en cuenta dos factores importantes, el primero y más importante es la turbulencia del agua, por lo tanto, deberá estar lo suficientemente alejada de la caída de agua que la presa pueda provocar ya que esto puede aturdir a las especies. Otro factor por considerar es la altura a la cual nadan los peces existentes en el río, ya que si su especie nada por el fondo del río este debería poseer una conexión con el fondo de la escalera y así evitar confusión del pez que se incorporará al cauce natural (DVWK, 1996).

Se debe evitar altas turbulencias y velocidades mayores a 2m/s en el flujo del río después de la salida de la escalera de peces de modo que las especies dejen la estructura con mayor facilidad, siempre y cuando la salida este libre y limpia de desechos por tal razón se recomienda un mantenimiento continuo (DVWK, 1996).

2.4.2.2.1. Condiciones por cumplirse en la salida

- La salida del agua deberá adquirir una velocidad mayor a 2 m/s (DVWK, 1996).
- La salida debe estar alejada a una distancia mayor a 2 metros de la coronación del azud (DVWK, 1996).
- Debe estar salvaguardada de materiales flotantes (DVWK, 1996).
- Se requiere la implementación de una compuerta que permita realizar un mantenimiento e impedir la migración de especies no deseables (DVWK, 1996).
- A la salida de la estructura se requiere tener una hendidura vertical (DVWK, 1996).

2.4.3. LONGITUDES

La longitud de una escalera de peces depende de varios parámetros físicos de la estructura como pendiente, profundidad, anchura y caudal de la estructura, diseño geométrico de la estructura, capacidades biológicas de la especie objetivo (Rojas & Tarambis, 2012).

La longitud corporal de las especies es una consideración importante para determinar las dimensiones de la escalera de peces. Se debe analizar la especie más representativa o abundante, así como también un promedio de la longitud corporal de las especies más grandes esperadas en el río (DVWK, 1996).

En función de la longitud corporal del pez se puede conocer las velocidades punta de distintas especies, se estudia tres especies diferentes y se llegó a la conclusión que las velocidades son independientes de la especie tomando un valor de 10 LC/s, siendo LC la longitud corporal del pez (Bainbridge, 1960). Este valor se ha tomado de manera general por algunos autores pero (Videler, 1993) considera la velocidad de 10 LC/s para peces en el rango de 10 a 20 cm de longitud. En los ciprínidos es habitual valores menores, entre 4 y 9 LC/s (Webb, 1975), y en los salmónidos valores superiores de hasta 15 LC/s (Weaver, 1963).

El tamaño del pez determina la capacidad de natación con relación a la velocidad y resistencia (Videler, 1993). La temperatura del agua tiene gran incidencia en la capacidad de franqueo de obstáculos por parte de los peces, afectando las características físicas del agua como el metabolismo del pez. Es decir que mientras la velocidad aumenta con la temperatura del agua el tiempo de resistencia disminuye, considerando ambas variables se obtiene la capacidad de tránsito del pez por la estructura (Bermúdez, 2013).

Para estimar las velocidades y tiempo de permanencia se presentan las siguientes graficas definidas en la figura 18:

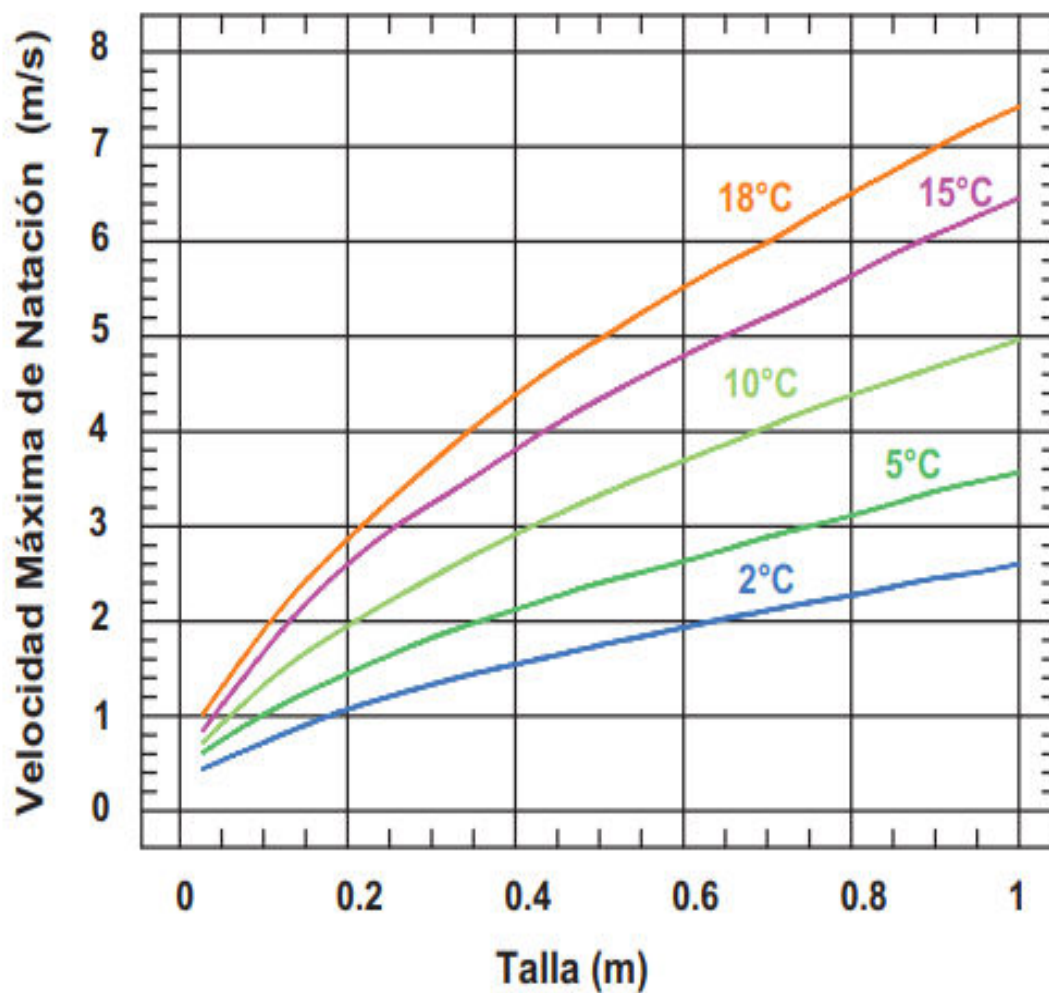


Figura 20 Velocidad máxima de natación en función de la longitud corporal del pez (LC).

Fuente: Bermúdez (2013)

2.4.4. PENDIENTES

Las pendientes varían en función del caudal y características del río. La pendiente del río es uno de los indicadores importantes cuando se requiere simular un río artificial como estructura de transporte de caudal ecológico.

Asimismo, la pendiente es un componente primordial en el efecto del agua en la superficie, ya que debido a esto el río adquiere una velocidad de tal manera que produce efectos de erosión y arrastre de sedimentos.

La pendiente es una característica física que permite determinar los regímenes de flujo, cambios de pendiente cercanos al obstáculo tomando en cuenta un análisis de saltos hidráulicos cercanos a la ubicación de la escalera de peces. Así también permite determinar velocidades supercríticas para una ubicación adecuada del canal de salida de la estructura.

La pendiente y la longitud del estanque son las principales dimensiones geométricas que afectan al flujo en la escalera. Un valor mayor tanto de pendiente como de longitud del estanque implica velocidades altas debido a que el salto entre piscinas aumenta (Bermúdez, 2013).

Los rangos permisibles de pendiente oscilan entre el 5 y 10 %, mientras que para simular cauces naturales debe mostrar pendientes de hasta el 15%.

2.4.5. TIEMPOS DE PERMANENCIA

El tiempo de permanencia está relacionada con la resistencia de natación a una velocidad máxima. Como se muestra en la figura 19 según la longitud del pez y la variación de la temperatura, genera un determinado tiempo de permanencia a

cierta velocidad, es decir que a mayor temperatura mayor es la velocidad que puede alcanzar el pez.

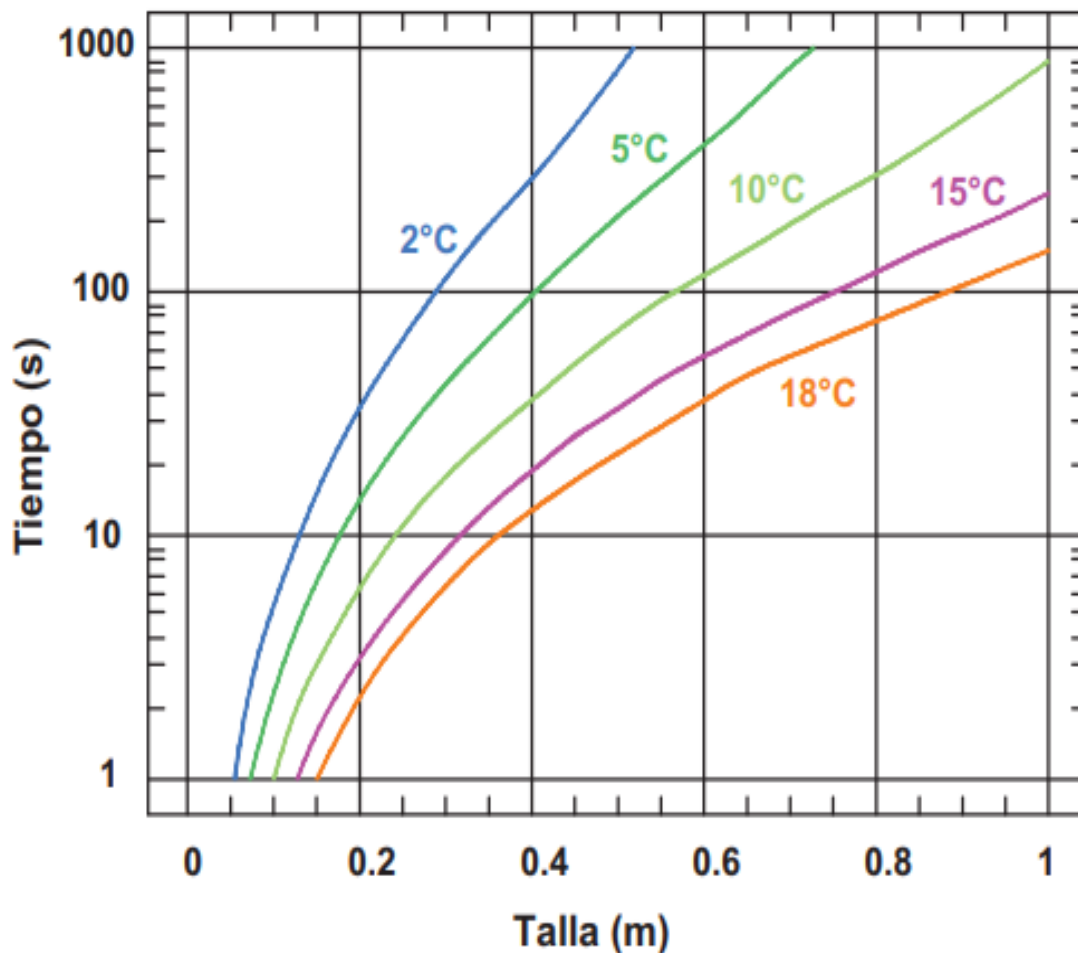


Figura 21 Tiempo de permanencia en función de la LC.

Fuente: Bermúdez (2013)

Se podrá obtener un resultado similar con el ábaco (figura 22) propuesto por Zhou y Larinier, que permite obtener el tiempo de permanencia y velocidad de nado, en función de la longitud del pez y la temperatura del río.

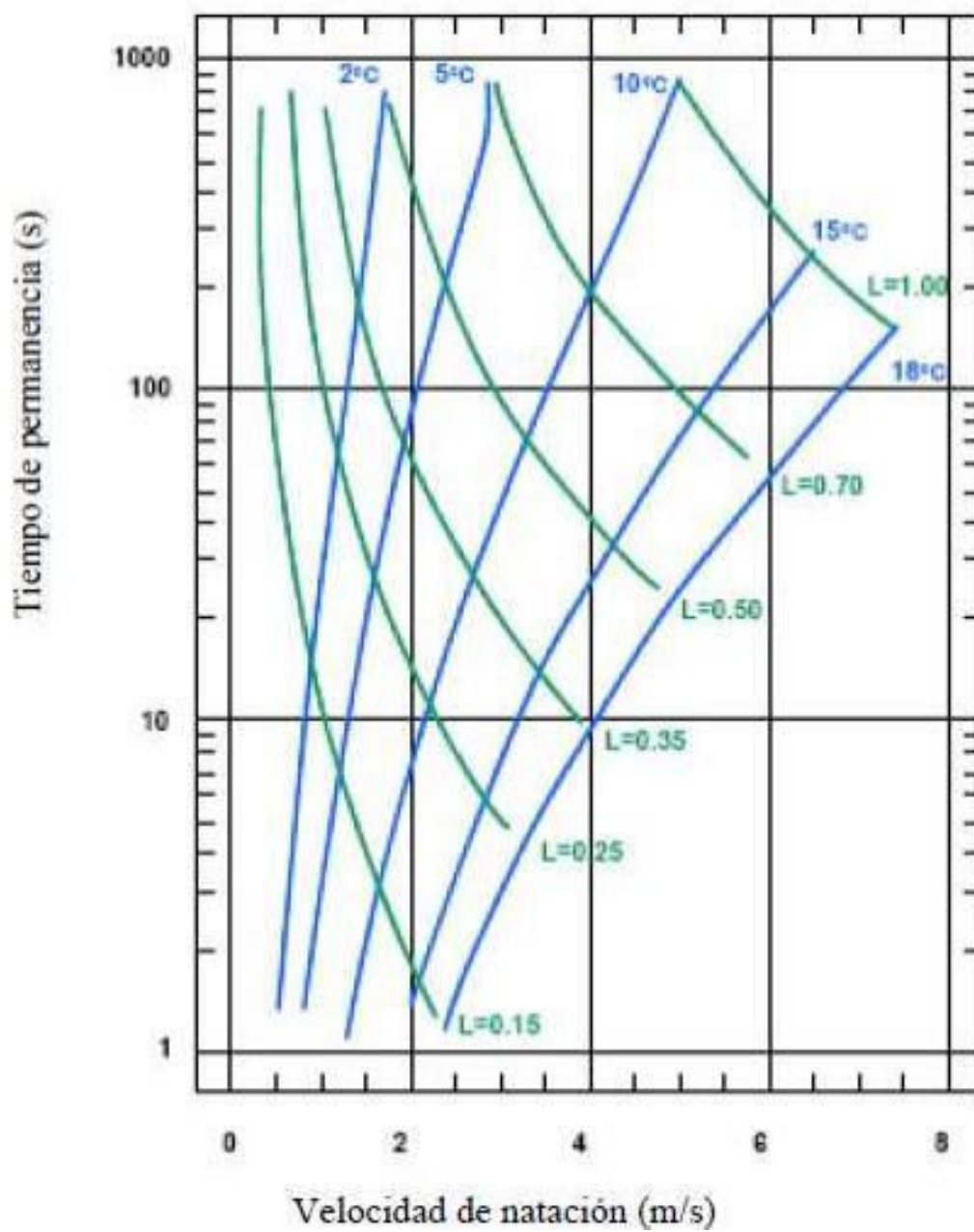


Figura 22 Tiempo de permanencia - Velocidad de nado

Fuente: Rojas & Tarambis (2012)

CAPITULO 4

En este capítulo se detalla la base de diseño hidráulico que se utiliza para el dimensionamiento de las escaleras de peces seleccionadas, adicionalmente se tomara en cuenta las diferentes condiciones de diseño que se presenten para cada tipo.

BASE DE DISEÑO DE LA ESCALERA DE PECES

Para realizar el dimensionamiento de los diferentes tipos de escaleras de peces siempre se debe tomar en cuenta los niveles de agua tanto arriba como abajo, velocidad del flujo que circula en el río cerca al obstáculo, temperatura del agua, estudios hidrológicos, estudios biológicos es decir analizar el tipo de peces que se encuentran presentes en el río y a su vez seleccionar la especie de mayor relevancia como se indica en el subcapítulo 4.1.

Por otra parte, se debe tomar en cuenta los criterios que se mencionaron en el subcapítulo 2.1, donde el caudal circulante por la estructura debe ser el caudal ecológico capaz de garantizar un equilibrio entre las partes del ecosistema y las capacidades biológicas de la especie objetivo.

4.1. ESPECIE OBJETIVO

Para determinar nuestra especie objetivo para el diseño de los diferentes tipos de escaleras se debe analizar las capacidades biológicas del pez (estudio biológico a las especies encontradas en el área de estudio). Basado en el estudio se debe seleccionar a la especie que tenga mayor relevancia.

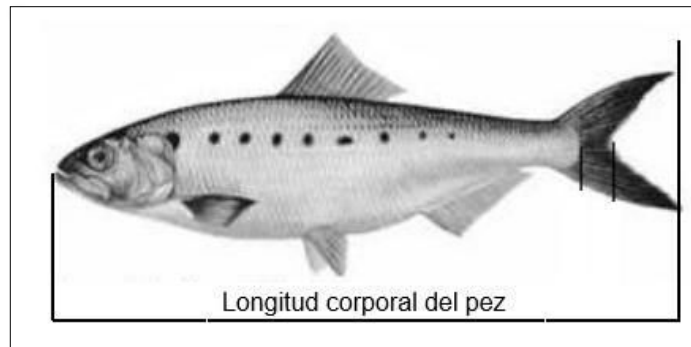


Figura 23 Longitud corporal total del pez.

Elaborado por: Barrera y Sanunga

4.1.1. VELOCIDAD MÁXIMA DEL PEZ (V_{max})

Para la obtención de la velocidad máxima de nado de la especie objetivo se utilizará el ábaco mostrado en la figura 20, siempre y cuando se conozca la temperatura del agua y la longitud corporal del pez.

4.1.2. TIEMPO DE PERMANENCIA (t_p)

El tiempo que permanecerá la especie se obtendrá mediante el ábaco que se muestra en la figura 21, conociendo la temperatura del agua y la longitud corporal del pez.

4.1.3. VELOCIDAD DE NADO (V_n)

La velocidad a la que atraviesa el pez por la escalera se puede obtener mediante el ábaco que se muestra en la figura 22, considerando la temperatura del agua y la longitud corporal del pez.

Se debe considerar que los valores que obtengamos de los diferentes ábacos dependen del observador, mismos que pueden tener un margen de variación por dicho motivo.

4.1.4. DISTANCIA RECORRIDA POR EL PEZ

$$D_r = (V_n - V_d) * t_p \quad (1)$$

Donde:

D_r : Distancia recorrida por el pez (m), si esta longitud es mayor que la longitud de la piscina significa que el pez atravesara el obstáculo.

V_n : Velocidad de nado del pez (m/s).

V_d : Velocidad máxima en el dispositivo (m/s).

t_p : Tiempo de permanencia (s).

4.2. BASE DE DISEÑO DE LA ESCALERA TIPO HENDIDURA VERTICAL

Para el diseño de escalera de hendidura vertical se tomó en cuenta las cuatro principales familias de peces encontradas en los estudios de impacto ambiental en los ríos del Ecuador a los cuales tuvimos acceso, las cuales son: ciprínidos, salmónidos, siludiformes y characiformes. Posteriormente se escogió dos modelos de escaleras de hendidura vertical, uno para ciprínidos y salmónidos y otro para las dos familias restantes, los cuales son los que respondían de mejor manera para el tamaño de nuestras especies acuáticas.

El primer modelo se encuentra en el grupo de modelos rápidos ya que su geometría genera una corriente de atracción mayor y guía el flujo de agua dentro de la misma, lo cual permite que especies grandes y con mejores capacidades natatorias puedan atravesarla de mejor manera. Por otra parte, el segundo modelo pertenece al grupo de modelos lentos debido a que su geometría provoca que el flujo de agua sea más disperso lo que permite que especies más pequeñas y con una capacidad natatoria más baja puedan cruzar de una forma más fácil (Pena et al., 2010).

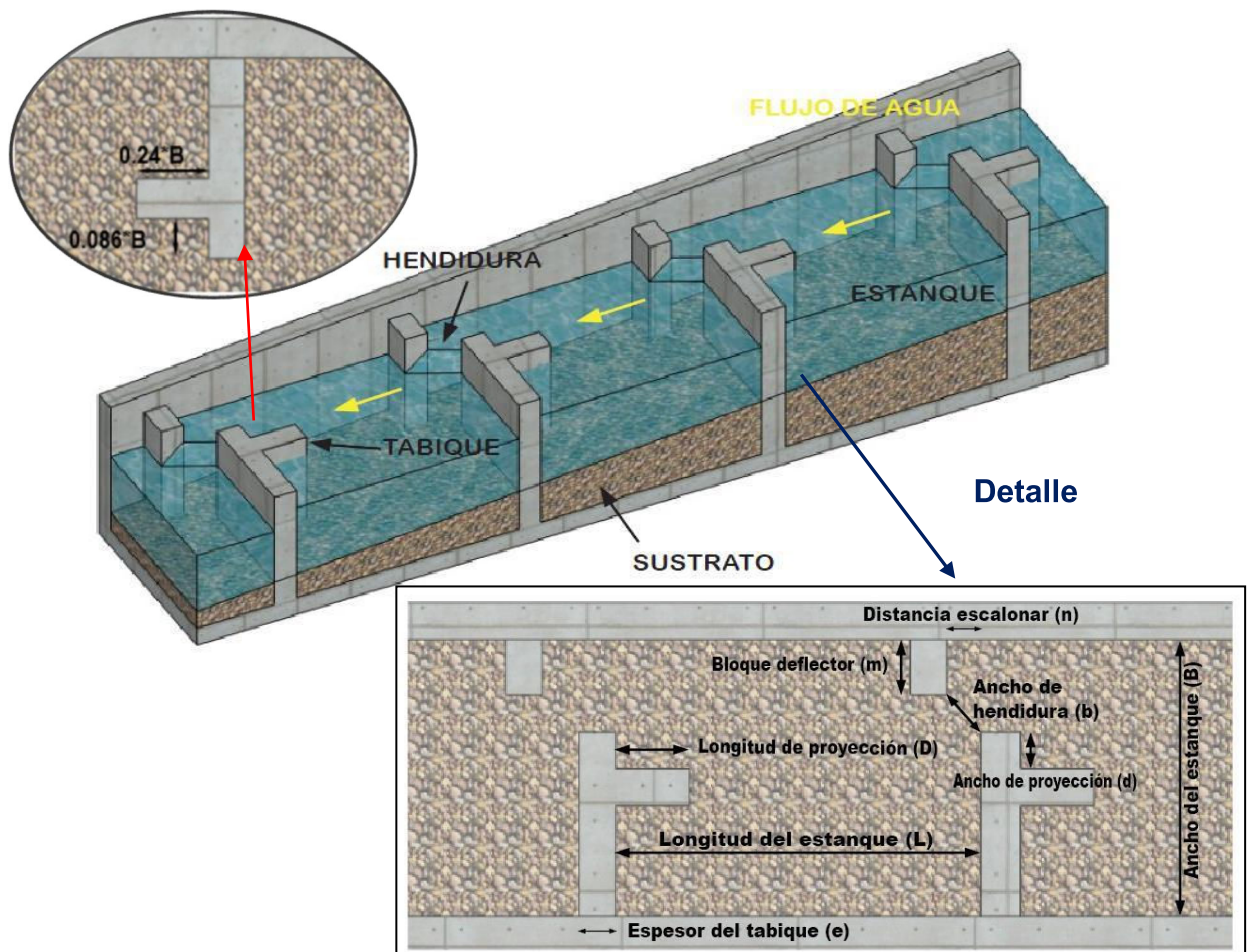


Figura 24 Diseño de escalera de peces de hendidura vertical. Modelo I.

Fuente: Pena et al. (2010)

Elaborado por: Barrera y Sanunga

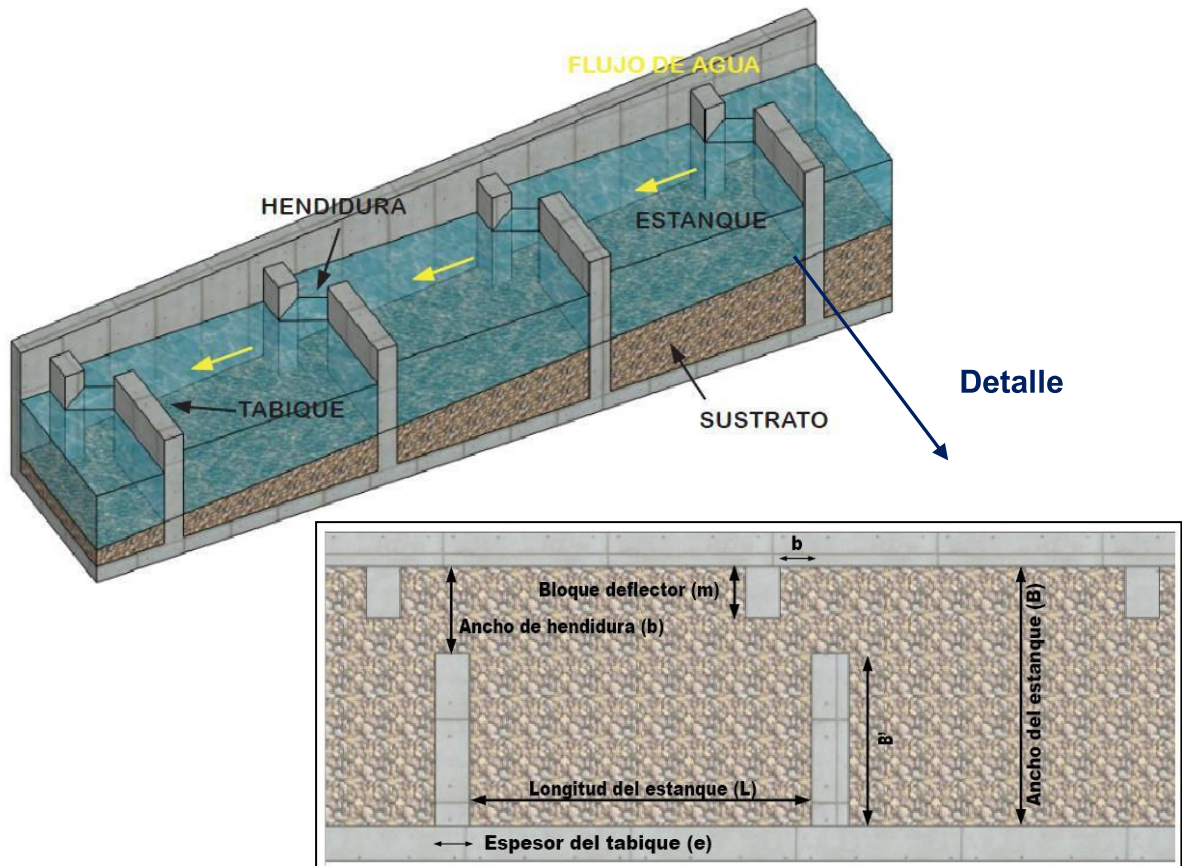


Figura 25 Diseño de escalera de peces de hendidura vertical. Modelo II.

Fuente: Pena et al. (2010)

Elaborado por: Barrera y Sanunga

La escalera de peces de hendidura vertical está conformada por una serie de estanques con características hidráulicas y geométricas idénticas. Las dimensiones de los peces, tanto el largo como el ancho del pez, deben ser medidas en campo ya que con esta información se dimensionarán varios elementos dentro de la escalera.

4.2.1. ANCHO DE LA ESCOTADURA (b)

Según Schmutz y Mielach (2013), el ancho de la escotadura será calculado con la siguiente ecuación que está en función del ancho del pez:

$$b = 3 * W_{pez} \quad (2)$$

Donde:

b : Ancho de la escotadura, la DVWK (1996) recomienda valores entre 0.15 y 0.17 m.

W_{pez} : Ancho del pez (m).

4.2.2. DIMENSIONES DEL ESTANQUE

4.2.2.1. Largo del estanque (L)

Para determinar el largo del estanque se utilizará la longitud corporal del pez, mediante la siguiente ecuación obteniendo un valor mínimo:

$$L = 3 * L_{pez} \quad (3)$$

Donde:

L : Largo del estanque, se recomienda que sea mayor a 1.90 m

L_{pez} : Largo del pez en metros.

4.2.2.2. Ancho del estanque (B)

Según Schmutz y Mielach (2013), refiere que el ancho del estanque posee una

relación geométrica con el largo de este, escrita a continuación:

$$B = \frac{3}{4} * L \quad (4)$$

Donde:

B : Ancho del estanque, se recomienda que sea mayor a 1.40 m.

L : Largo del estanque, se recomienda que sea mayor a 1.90 m

4.2.3. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

En el trabajo de investigación realizado por Bermúdez (2013), establece relaciones entre las dimensiones de la escalera con las cuales realiza diseños de laboratorio obteniendo resultados satisfactorios, por lo cual se decidió tomar esas mismas relaciones. Para el primer modelo tenemos las siguientes relaciones para el guiado del flujo:

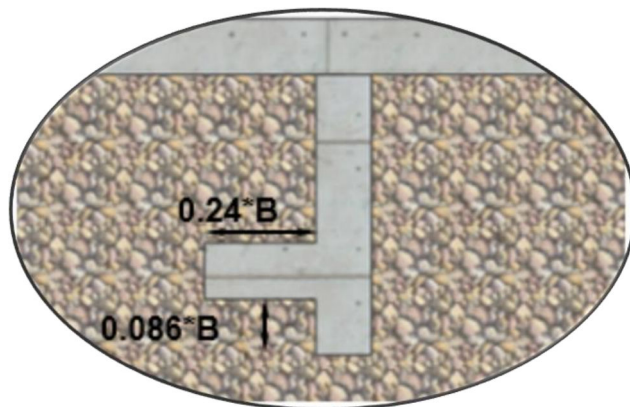


Figura 26 Detalle del guiado del flujo de la escalera tipo hendidura vertical modelo I.

Fuente: Bermúdez (2013)

Elaborado por: Barrera y Sanunga

- Bloque del deflector (m)

$$m = 1.36 * b \quad (5)$$

Donde:

m : Bloque deflector (m).

- Distancia escalonar (n)

$$n = 0.76 * b \quad (6)$$

Donde:

- Longitud (D) y ancho de proyección (d)

$$D = 0.24 * B \quad (7)$$

Donde:

D : Longitud de proyección (m).

$$d = 0.086 * B \quad (8)$$

Donde:

d : Ancho de proyección (m).

Para el segundo modelo presenta una sola relación para el bloque del deflector (m) debido a su estructura más sencilla:

$$m = 0.5 * b \quad (9)$$

Donde:

m : Bloque deflector (m).

4.2.4. CORTE LONGITUDINAL

A continuación, se presentará el corte longitudinal que muestra las alturas correspondientes a cada estanque.

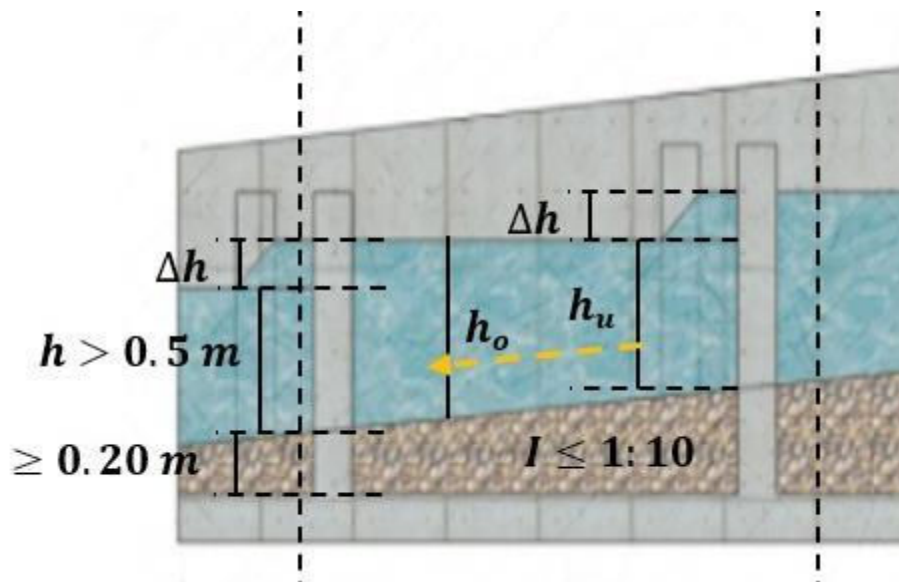


Figura 27 Corte Longitudinal de la sección del dispositivo.

Fuente: DVWK (1996)

Elaborado por: Barrera Edwin y Sanunga Daysi

Para poder calcular el número de estanques (N) que conformarán toda la estructura se requiere de forma indispensable la diferencia de cota aguas arriba y aguas abajo de la zona donde irá ubicada la escalera de peces, la DVWK (1996), nos

presenta la siguiente ecuación para ello y nos recomienda utilizar un salto de agua entre cada estanque de 0.20 m.

$$N = \frac{H_{total}}{\Delta h} - 1 \quad (10)$$

Donde:

N : Número de estanques.

H_{total} : Diferencia de cotas (msnm).

Δh : Salto de agua (m).

Los estanques poseen una altura mínima (h_u) de agua la cual se encuentra en la parte superior del estanque, esta altura mínima debe ser capaz de brindar condiciones óptimas de nado para los peces y está dada por la siguiente ecuación:

$$h_u = L_{pez} + 0.25m \quad (11)$$

Dónde:

h_u : Profundidad del agua hasta el sustrato (m).

L_{pez} : Longitud corporal del pez (m).

Por otra parte, la altura máxima (h_o) del estanque es igual a la altura mínima de estanque más la altura del salto y se encuentra ubicada en la parte inferior del estanque (DVWK, 1996).

$$h_o = h_u + \Delta h \quad (12)$$

Donde:

h_o : Altura hasta el nivel del agua medida desde el sustrato (m).

La profundidad media (h_m) del agua se debe tomar en cuenta para el cálculo de la energía de disipación, esta altura se encuentra ubicada en la mitad del estanque y su ecuación según la DVWK (1996) es la siguiente:

$$h_m = h_u + \frac{\Delta h}{2} \quad (13)$$

Donde:

h_m : Altura media en el siguiente estanque (m).

4.2.5. VELOCIDAD EN LA HENDIDURA ($V_{m\acute{a}x}$)

La velocidad máxima del flujo de agua dentro de la escalera es el factor más importante ya que los peces estarán limitados directamente a esta condición para poder cruzarla. La ecuación es la siguiente:

$$V_{m\acute{a}x} = \sqrt{2g\Delta h} \quad (14)$$

Donde:

$V_{m\acute{a}x}$: Velocidad máxima (m/s)

g : Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

4.2.6. CAUDAL POR TRANSITAR (Q)

En un estudio realizado Gebler (1993), se describe el gasto que circula por la escotadura mediante de la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{2}{3} \mu_r b \sqrt{2g} h_o^{\frac{2}{3}} \quad (15)$$

Dónde:

Q : Gasto de la escotadura, la DVWK (1996) recomienda que sea mayor a 140 lt/s.

μ_r : Coeficiente de descarga (adimensional).

- Coeficiente de descarga (μ_r)

Para el coeficiente de descarga μ_r será obtenido por medio del grafico establecido en la DVWK (1996), mismo que es una recopilación de los resultados experimentales realizados por Rajaratnam, Kruger y Gebler en sus respectivos trabajos.

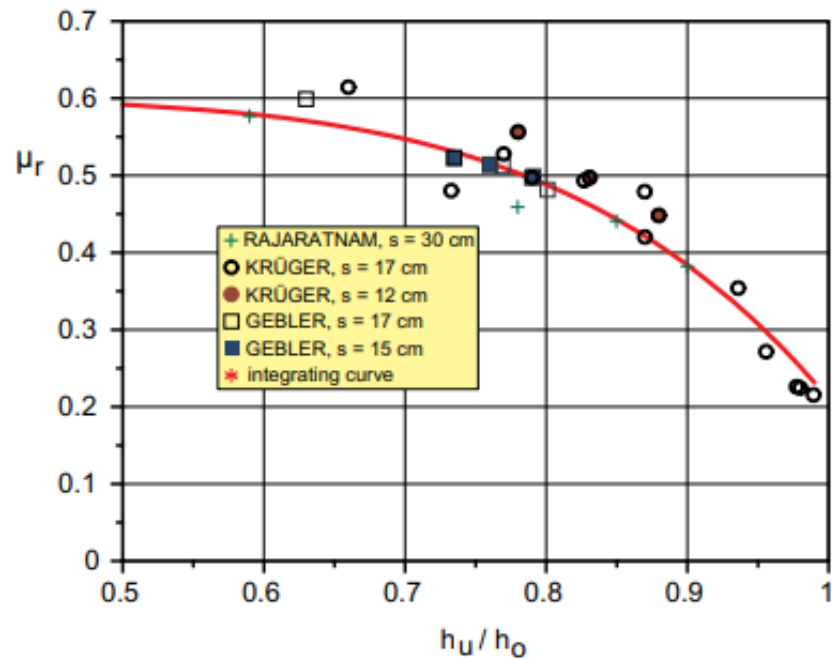


Figura 28 Ábaco del coeficiente de descarga relacionando h_u/h_o .

Fuente: DVWK (1996)

4.2.7. TURBULENCIA (E)

La energía de disipación dentro de la escalera dependerá de las especies que se encuentran, para especies grandes se puede poseer una energía de disipación inferior 200 W/m^3 y para especies pequeñas deberá ser inferior a 150 W/m^3 y se la calculará por medio de la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\rho g \Delta h Q}{B h_m (L - e_t)} \quad (16)$$

Donde:

E : Energía de disipación (W/m^3).

- ρ : Peso específico del agua (kg/m³).
- h_m : Altura media del estanque (m).
- e_t : Ancho del tabique, se recomienda un mínimo de 0.15 m.

4.2.8. CONDICIONES DE DISEÑO

El diseño de la escalera de peces obtenido con los cálculos y dimensiones ya mencionados, deberá ser evaluado con tres condicionantes establecidas a través de la bibliografía estudiada para saber si su funcionamiento es óptimo para las especies que utilizarán estas estructuras.

El primer condicionante será el caudal circulante por la escotadura, el cual debe cumplir con el 10% del caudal medio anual que circula por el río, correspondiente al caudal ecológico según indica el ministerio del ambiente para la conservación de las especies acuáticas.

$$Q \geq 0.10 * Q_m \quad (17)$$

Donde:

Q_m : Caudal medio anual (m³/s).

El segundo condicionante será la velocidad máxima dentro de la escalera de hendidura vertical, la cual deberá ser menor que la velocidad máxima de natación de los peces destinados a utilizar esta estructura. Para determinar esta velocidad máxima de natación se utilizará el ábaco representado en la Figura 20.

$$V_{m\acute{a}x} \leq V_n \quad (18)$$

Donde:

V_n : Velocidad de nado del pez (m/s).

El tercero y último condicionante es la distancia recorrida a una velocidad de natación promedio. Se evaluará la condición más crítica para el pez al momento de atravesar la escalera, lo que quiere decir cruzar toda la estructura sin descansar, a pesar de que tiene esta posibilidad en cada estanque.

Por otra parte, la distancia recorrida por el pez debe ser mayor a la longitud del estanque, y esta se obtendrá con la ecuación (1).

4.3. BASE DE DISEÑO DE LA ESCALERA TIPO ESTANQUES SUCESSIVOS

Para el diseño de este tipo de escaleras se debe tener en cuenta que posee un comportamiento óptimo frente a los cambios en los niveles de agua, es una de las estructuras con mayor utilidad ya que se adapta a cualquier tipo de especie de pez.

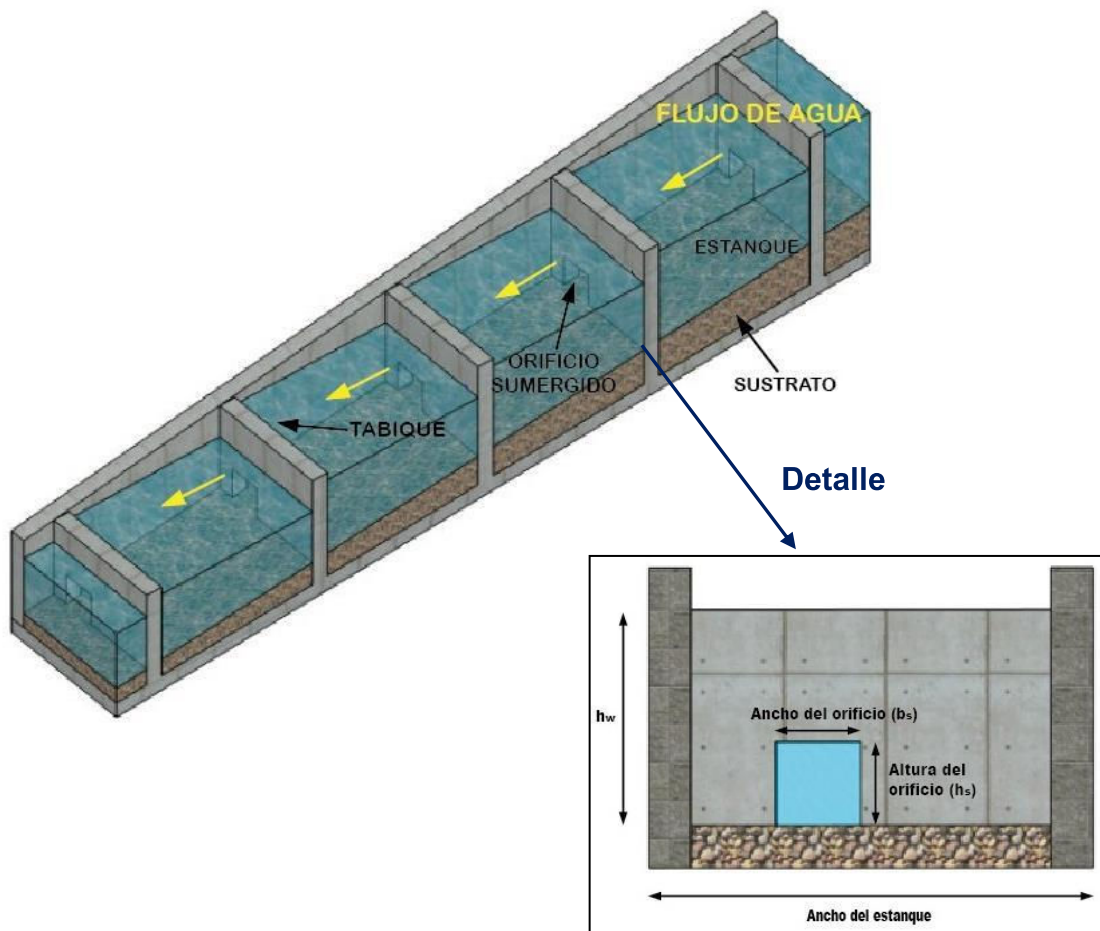


Figura 29 Diseño de escalera de peces tipo estanques sucesivos.

Fuente: DVWK (1996)

Elaborado por: Barrera y Sanunga

4.3.1. ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DE DISEÑO (Q)

Para estimar el caudal que va a transitar por la escalera de peces, tal como se indicó en el subcapítulo 2.1, el caudal mínimo por circular será igual al caudal ecológico. El caudal por transitar por la escalera de peces se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$Q = 10\% Q_m \quad (19)$$

Donde:

Q : Caudal circulante o caudal ecológico (m³/s).

Q_m : Caudal promedio anual (m³/s).

En el país se obtiene el caudal promedio anual mediante los datos que proporciona el INAMHI.

4.3.2. NÚMERO DE ESTANQUES (N)

La cantidad de estanques que se van a requerir para la escalera de peces se calcula con la siguiente ecuación:

$$N = \frac{H_{total}}{\Delta h} - 1 \quad (20)$$

Donde:

Δh : Salto de agua, recomendación de 0.20 m.

H_{total} : Diferencia de cotas (msnm).

N : Número de estanques.

Si existe una variación del nivel de aguas abajo es necesario calcular un salto mínimo, el cual se obtendrá con la siguiente ecuación:

$$\Delta h_{min} = \frac{H_{total}}{N + 1} \quad (21)$$

Donde:

Δh_{min} : Salto mínimo (m).

H_{total} : Diferencia de cotas (msnm).

N : Número de estanques.

4.3.3. DIMENSIONAMIENTO DEL ORIFICIO

El caudal (Q_o) transita a través de un orificio sumergido por esta razón es analizado con la siguiente ecuación:

$$Q_o = Cd A_s \sqrt{2g\Delta h} \quad (22)$$

Donde:

Q_o : Caudal en el orificio, es decir, el caudal circulante (m³/s).

Cd : Coeficiente adimensional de descarga, el cual varía entre 0,65 y 0,85, la DVWK (1996) recomienda un valor promedio de 0.75.

A_s : Área del orificio sumergido (m²).

g : Aceleración de la gravedad (m/s²).

Δh : Salto de agua (m).

4.3.3.1. Altura (h_s) y base (b_s) del orificio

La altura y la base, se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$A_s = h_s * b_s \quad (23)$$

Si se considera que el orificio es de forma cuadrangular la base tendrá la misma dimensión que la altura, es decir:

$$h_s = b_s \quad (24)$$

$$A_s = (b_s)^2 \quad (25)$$

$$b_s = \sqrt{A_s} \quad (26)$$

Donde:

A_s : Área del orificio sumergido (m²).

h_s : Altura del orificio (m).

b_s : Base del orificio (m).

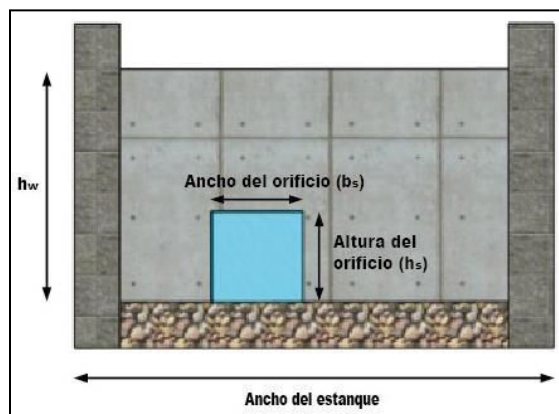


Figura 30 Corte transversal de la escalera de peces tipo estanques sucesivos con orificio sumergido.

Fuente: DVWK (1996)

4.3.3.2. Velocidad en el orificio (V_o)

La velocidad que se presentará en el orificio se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$V_o = \frac{Q_o}{A_s} \quad (27)$$

Donde:

V_o : Velocidad en el orificio, la DVWK (1996) recomienda que sea menor a 2 m/s.

Q_o : Caudal en el orificio, es decir, el caudal circulante (m^3/s).

A_s : Área del orificio sumergido (m^2).

4.3.4. DIMENSIONAMIENTO DEL ESTANQUE

4.3.4.1. Calado mínimo en el estanque (h_m)

Para calcular el calado mínimo dentro del estanque se utilizará la siguiente ecuación:

$$h_m = h + \frac{\Delta h}{2} \quad (28)$$

$$h = LC + 0.25 \quad (29)$$

Donde:

h_m : Calado mínimo (m).

h : Profundidad del agua hasta el sustrato, se obtiene con la suma de la longitud del pez más 0,25 m.

LC : Longitud corporal del pez (m).

Δh : Salto de agua (m).

4.3.4.2. Longitud del estanque (L_e)

La DVWK (1996) recomienda dimensiones para el diseño de escaleras de peces, las cuales se presentan a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 14

Dimensiones recomendadas para la escalera de peces en función del tamaño del pez.

Tamaño del pez (m)	Dimensiones del estanque (m)			Dimensión del orificio sumergido (m)		Escotadura lateral (m)		Caudal en el dispositivo (m ³ /s)	Salto máximo de agua (m)
	Longitud	Ancho	Profundidad del flujo	Ancho	Altura	Ancho	Altura		
	lb	b	h	bs	hs	ba	ha	Q	Δh
Mayor a 0.70	5 – 6	2.5 – 3	1.5 – 2	1.5	1	-	-	2.5	0.20
0.70 - 0.30	2.5 – 3	1.6 – 2	0.8 – 1.0	0.4 – 0.5	0.3 – 0.5	0.3	0.3	0.2 – 0.5	0.20
0.30 – 0.15	1.4 – 2	1.0 - 1.5	0.6 – 0.8	0.25 – 0.35	0.25 – 0.35	0.25	0.25	0.08 – 0.2	0.20
Menor a 0.15	> 1.0	> 0.8	> 0.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.05 – 0.1	0.20

Fuente: DVWK (1996)

La longitud de la piscina se obtendrá con la siguiente ecuación para obtener la turbulencia (E) o también llamada energía de disipación:

$$E = \frac{\rho g \Delta h Q}{B_e h_w (L_e - e_t)} \quad (30)$$

Donde:

Q : Caudal circulante total (m^3/s).

E : Energía disipada, esta depende de la especie que se esté analizando, pero se recomienda que no sea mayor a $200 W/m^3$.

ρ : Densidad del agua (kg/m^3).

B_e : Ancho del estanque (m).

L_e : Longitud del estanque (m).

e_t : Espesor del tabique, se recomienda un espesor de 0.15 m.

Se recomienda que se escoja el ancho del estanque basada en la tabla 14 de dimensiones recomendadas según el tamaño del pez.

4.3.5. DIMENSIONAMIENTO DE LA ESCALERA

4.3.5.1. Pendiente (S)

Para obtener la pendiente de la escalera de peces se utilizará la siguiente ecuación:

$$S = \frac{\Delta h}{L_e} \quad (31)$$

Donde:

S : Pendiente (%).

Δh : Salto de agua (m).

L_e : Longitud del estanque (m).

La pendiente debe estar dentro de los parámetros establecidos anteriormente es decir en un valor entre 5 y el 10 % generalmente.

4.3.5.2. Longitud total de la escalera (LE_{total})

La longitud total de la escalera se obtiene mediante la siguiente ecuación que está en función de la cantidad de estanques y la longitud del estanque:

$$LE_{total} = L_e * N \quad (32)$$

Donde:

LE_{total} : Longitud total de la escalera (m).

L_e : Longitud del estanque (m).

N : Número de estanques.

4.3.5.3. Velocidad en la entrada (V_a)

$$V_a = \sqrt{2g\Delta h} \quad (33)$$

Donde:

V_a : Velocidad en la entrada de la escalera, el rango de velocidad es de 0.8 a 2 m/s.

g : Aceleración de la gravedad (m/s^2).

Δh : Salto de agua (m).

4.3.5.4. Piscina a la entrada y salida de la escalera

Para obtener las dimensiones de la piscina se utilizará los criterios analizados en el capítulo 2:

$$h_{piscina} = \frac{1}{3} \text{ ó } \frac{1}{2} * H_{total} \quad (34)$$

$$L_{piscina} = 7 \text{ ó } 10 * H_{total} \quad (35)$$

Donde:

$h_{piscina}$: Profundidad de la piscina que se mide desde la parte baja del último tabique del dispositivo, sea mayor a 1m (Clay, 1995).

H_{total} : Diferencia de cotas (msnm).

$L_{piscina}$: Longitud de la piscina (m).

$$b_{piscina} = B_e + 1 \quad (36)$$

Donde:

$b_{piscina}$: Ancho de la piscina (m).

B_e : Ancho del estanque (m).

Se recomienda que se construya una rampa no mayor de 45°, para que exista la unión entre la entrada de la escalera de peces con el fondo de la piscina.

CAPITULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se presenta el desarrollo del diseño de la herramienta MACRO, su uso y la obtención de resultados con bases y criterios de un estudio de caso basada en la información recopilada para el dimensionamiento de los tipos de estructuras seleccionadas.

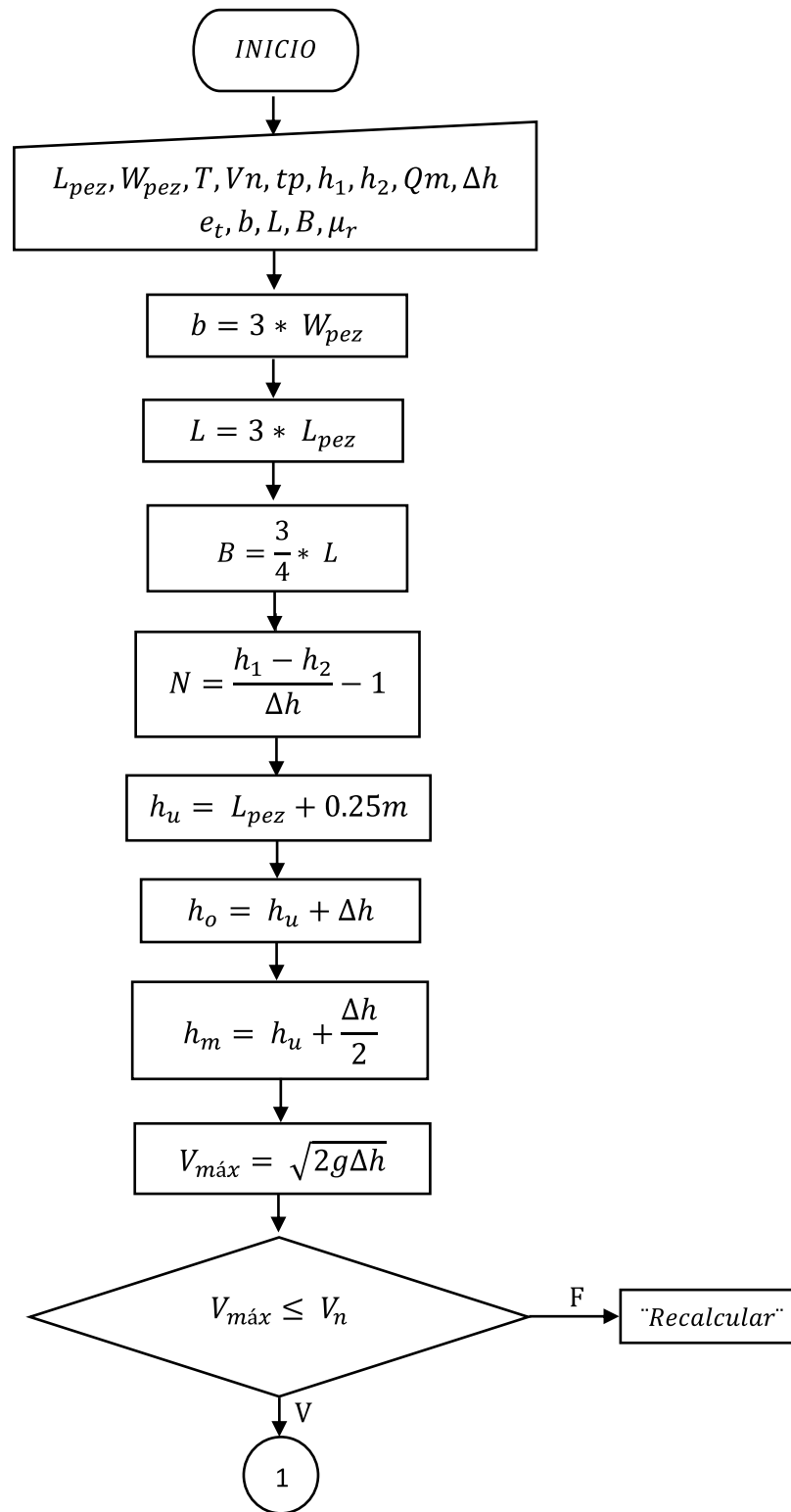
5.1. DISEÑO DE HERRAMIENTA (MACROS)

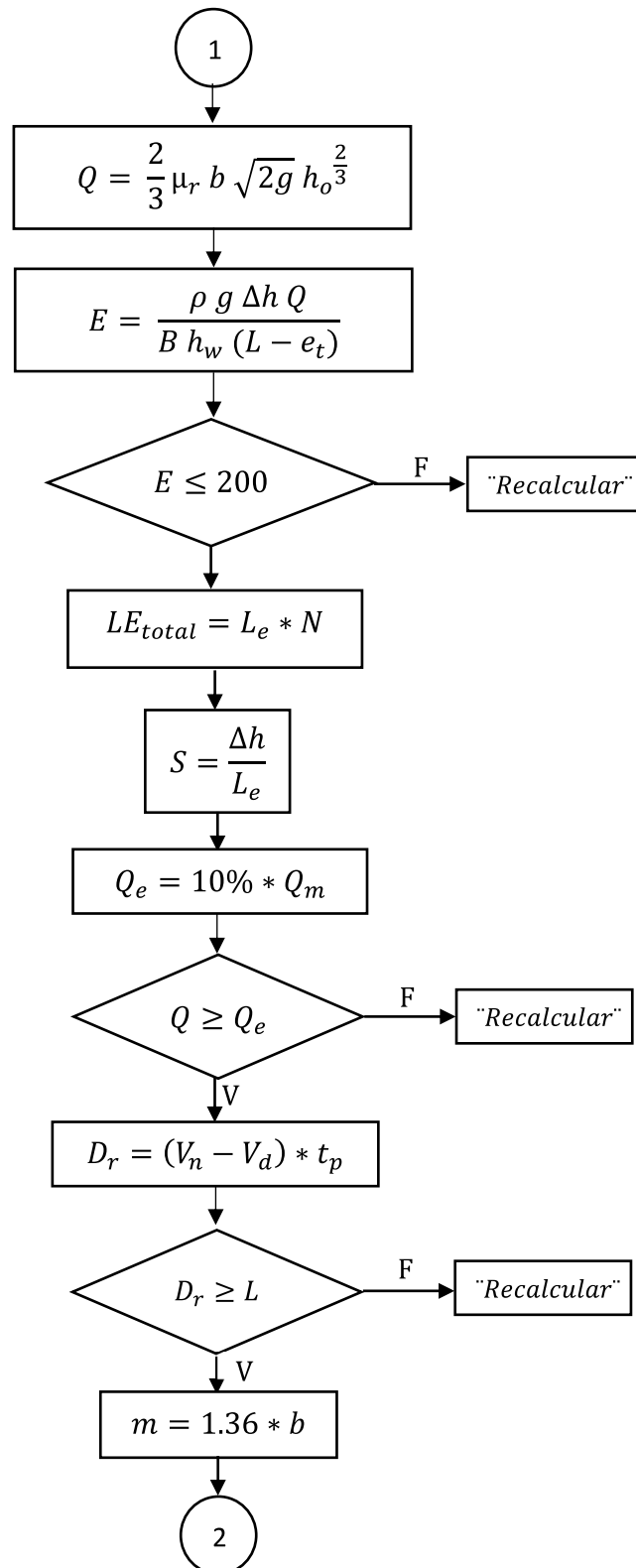
La elaboración de la herramienta que nos permite obtener el dimensionamiento de las escaleras de peces de tipo estanques sucesivos y hendidura vertical se la realiza siguiendo los diagramas de flujo que se presenta a continuación.

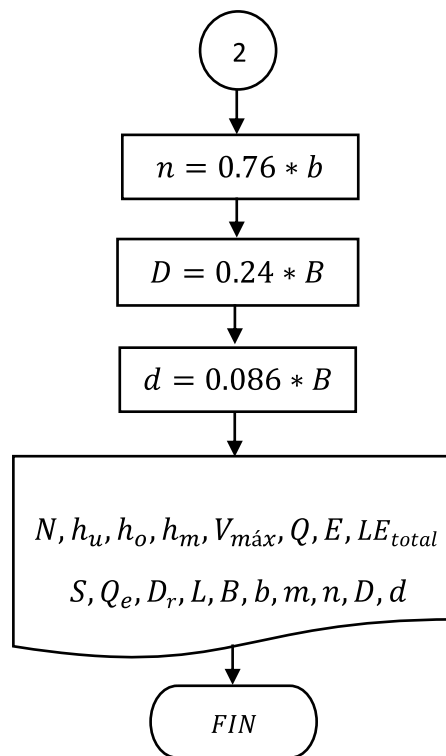
5.1.1. DISEÑO DE LA HERRAMIENTA PARA LA ESCALERA TIPO HENDIDURA VERTICAL

5.1.1.1. Escalera tipo Hendidura Vertical modelo I

El diagrama de flujo muestra el procedimiento que se sigue para elaborar la herramienta de la escalera tipo hendidura vertical modelo I.

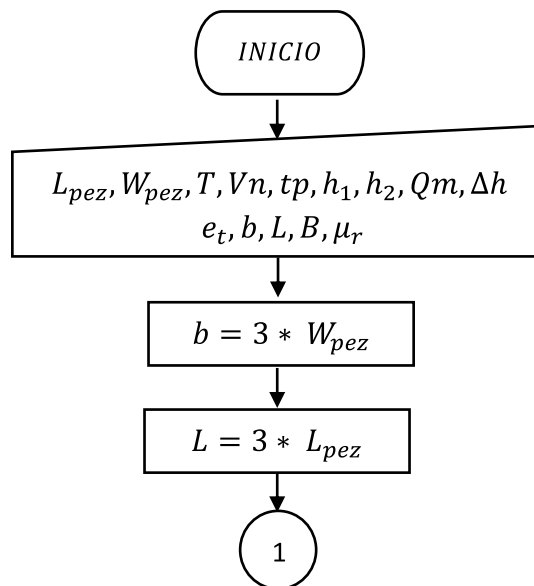


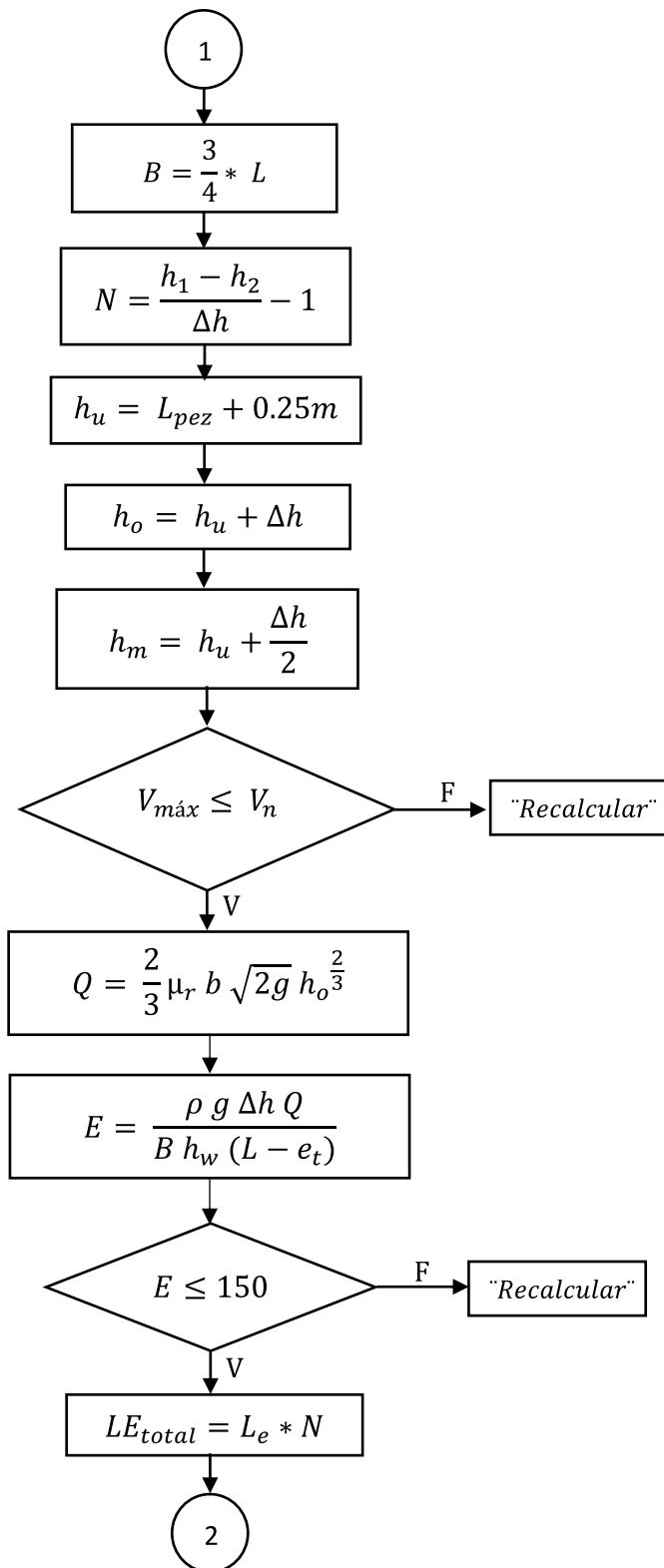


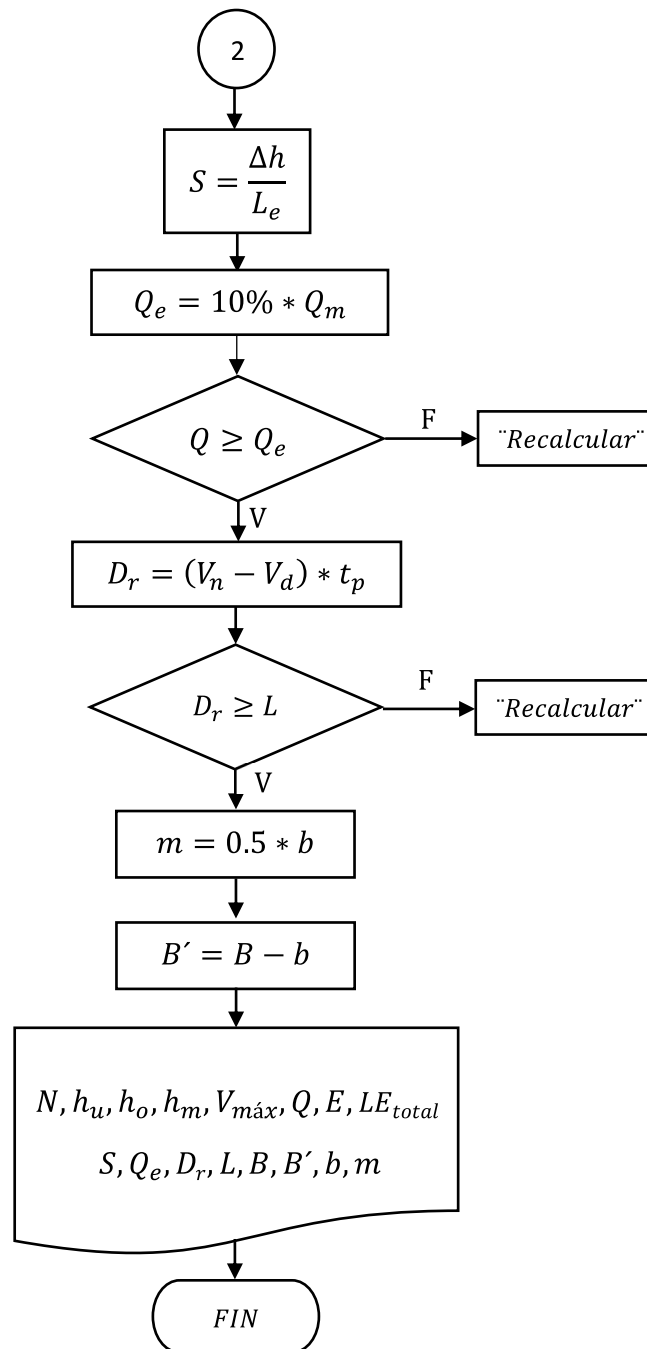


5.1.1.2. Escalera tipo Hendidura Vertical modelo II

El diagrama de flujo muestra el procedimiento que se sigue para elaborar la herramienta de la escalera tipo hendidura vertical modelo II.



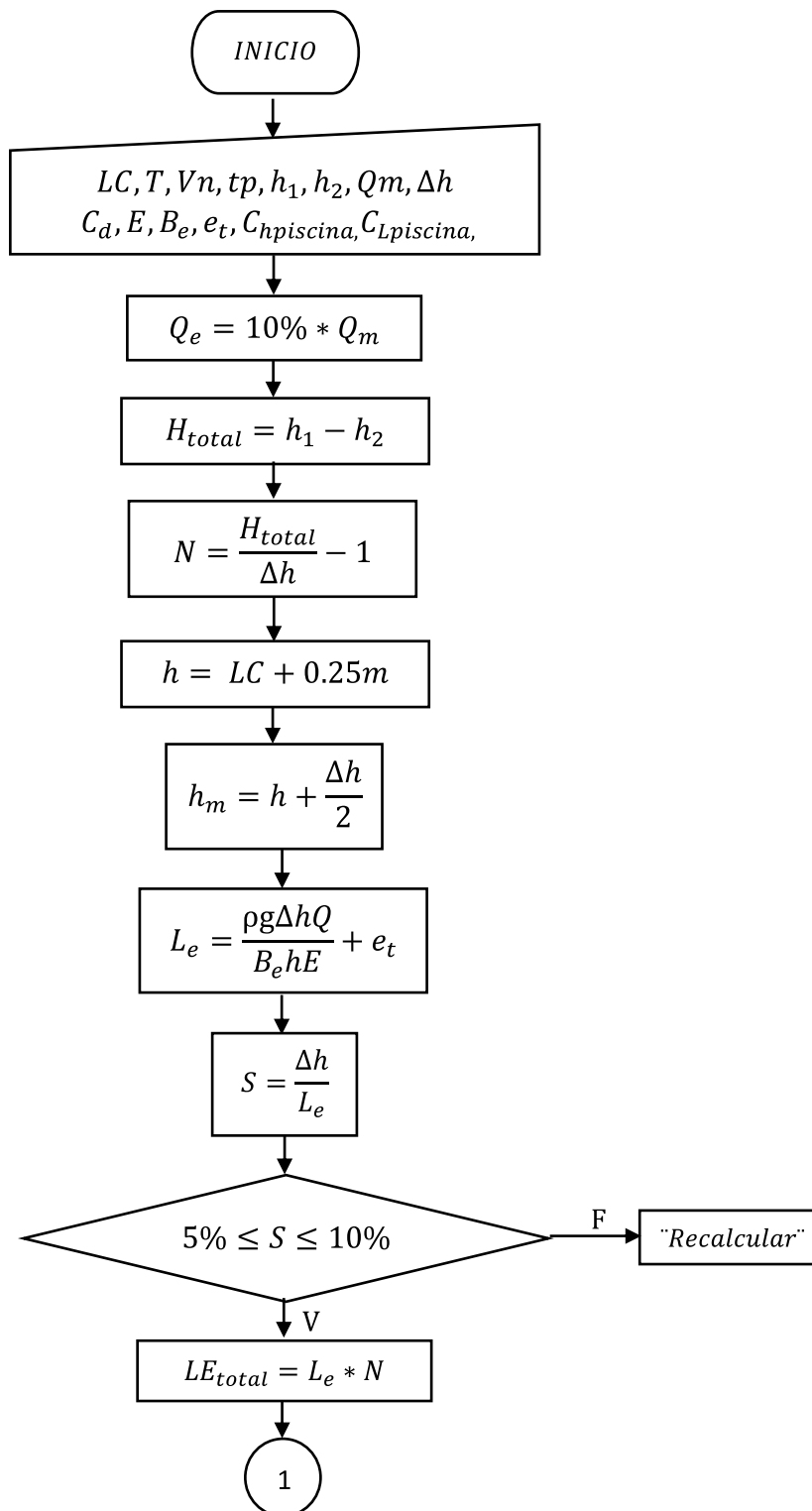


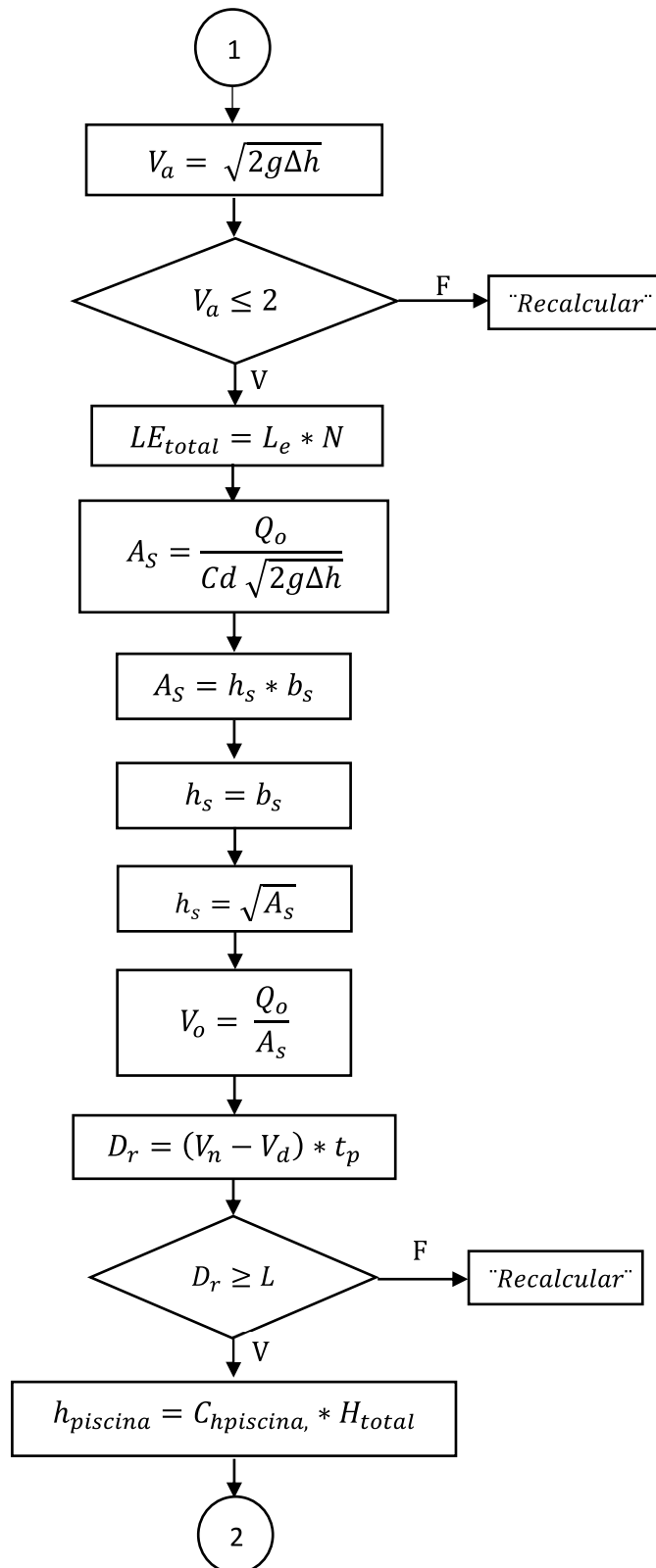


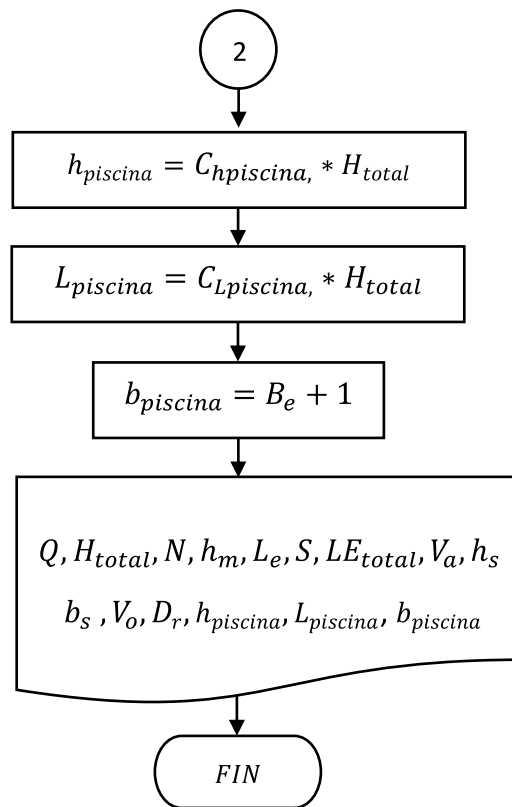
5.1.2. DISEÑO DE LA HERRAMIENTA PARA LA ESCALERA TIPO ESTANQUES SUCESIVOS

Para la herramienta de la escalera tipo estanque sucesivos se sigue el

siguiente diagrama de flujo.







5.2. MANUAL DE USO

5.2.1. VENTANA DE INICIO

Una vez se ejecute el programa este abre automáticamente mostrando la ventana de inicio en la cual se encuentra el contenido del programa, nombre de la universidad y autores. También encontramos el botón “Siguiente” el cual nos permite avanzar a la siguiente ventana de la MACRO.



Figura 31 Ventana de inicio de la herramienta macro.

Elaborado por: Barrera y Sanunga

5.2.2. VENTANA DE ELECCIÓN DEL TIPO DE ESCALERA DE PECES

En esta ventana se muestran los tipos de diseños de escaleras de peces disponibles, mismos que poseen su respectivo botón de acceso, estos diseños son los siguientes:

- Escalera tipo estanques sucesivos.
- Escalera hendidura vertical tipo I.
- Escalera de hendidura vertical tipo II.

También existe un botón “Regresar” el mismo que permite volver a la ventana de inicio.

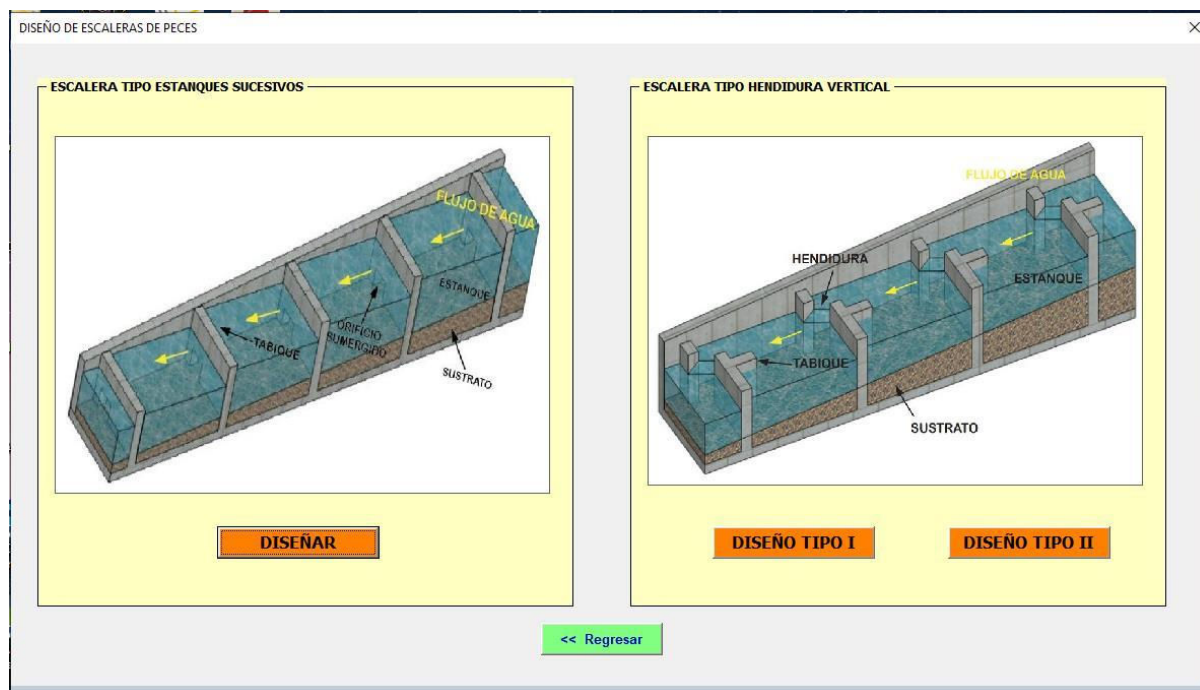


Figura 32 Ventana de selección de los diferentes tipos de escaleras.

Elaborado por: Barrera y Sanunga


5.2.3. VENTANA DE DISEÑO DE LA ESCALERA TIPO ESTANQUES SUCESIVOS

Esta ventana posee dos cuadros principales, el cuadro de datos de entrada y el cuadro de parámetros de diseño donde se muestra los resultados obtenidos por el programa. Por otra parte, encontramos los siguientes botones:

- “Borrar” que nos permite borrar todos los datos ingresados,
- “Calcular” que permite calcular todos los parámetros, dimensiones del diseño
- “Regresar” que permite regresar a la ventana de elección del tipo de escalera de peces.

DISEÑO DE ESCALERAS DE PECES

DATOS DE ENTRADA

Especie objetivo:  Longitud corporal: [m]

Temperatura del agua: [°C]

Velocidad de nado: [m/s] **Ábaco V-LC**

Tiempo permanencia: [s] **Ábaco Tp-LC**

Cotas aguas arriba: [msnm]

Cotas aguas abajo: [msnm]

Caudal medio anual: [m³/s]

Salto de agua: [m] **mínimo 0.20 m**

Coefficiente descarga: [-] **entre 0.65-0.85**

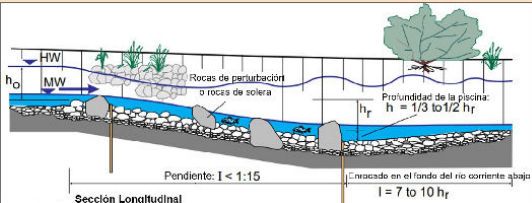
Energía de disipación: [W/m³] **<= 200 W/m³**

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

Espesor del tabique: [m] **mínimo 0.15 m**

Nota: las recomendaciones dado por la literatura se colocarán a lado derecho en color azul

PARÁMETROS DE DISEÑO



Caudal de diseño: [m³/s]

Diferencia de alturas: [m/s]

Número de estanques: [-]

Calado mínimo estanque: [m]

Largo del estanque: [m]

Pendiente: [%] **5 - 10%**

Longitud de la escalera: [m]

Velocidad en la entrada: [m/s] **< 2 m/s**

Altura del orificio: [m]

Base del orificio: [m]

Velocidad en el orificio: [m/s]

Distancia recorrida del pez: [m] **> Largo del estanque**

Piscina al inicio y final de la escalera

Profundidad de la piscina: **1/2 ó 1/3** [m]

Largo de la piscina: **7 ó 10** [m]

Ancho de la piscina: [m]

Borrar **Calcular** **<< Regresar**

Figura 33 Ventana de escalera de peces tipo estanques sucesivos.

Elaborado por: Barrera y Sanunga

En esta ventana también se encuentran los botones “Ábaco V-LC” y “Ábaco Tp-LC” los cuales desplegarán los ábacos que permitirán determinar los datos de velocidad de nado y tiempo de permanencia. En esta misma ventana se muestra el botón “Regresar” el cual permite volver a la venta de la escalera tipo estanques sucesivos.

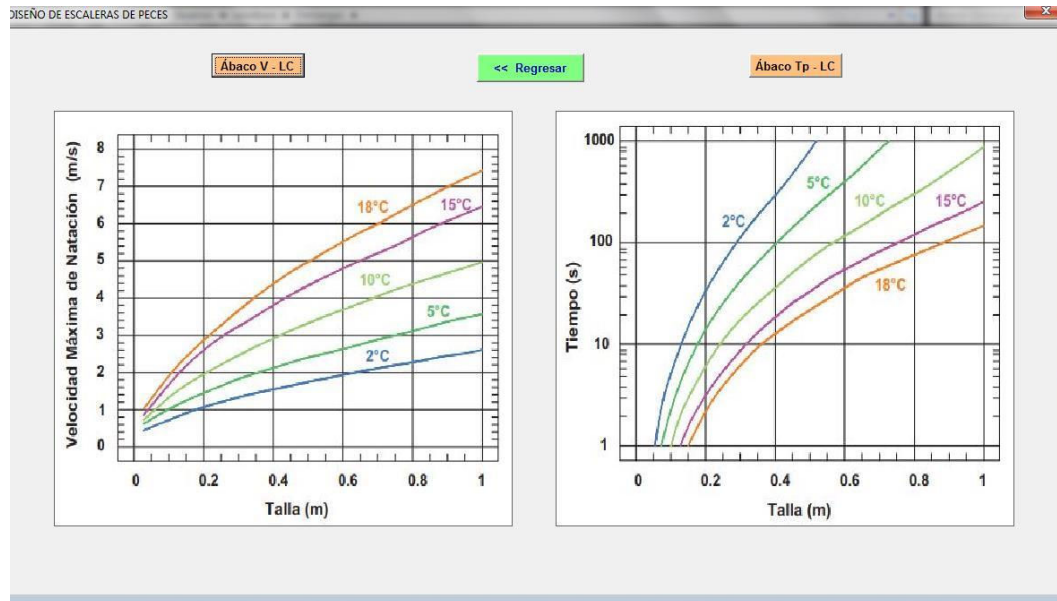


Figura 34 Ventana de los ábacos Velocidad máxima de nado – Longitud corporal, Tiempo de permanencia – Longitud corporal.

Elaborado por: Barrera y Sanunga

Finalmente existe el botón "Tabla" el cual abre la tabla de dimensiones recomendadas de la escalera en función del tamaño del pez, donde se escoge el valor del ancho del estanque que se requiere.

DISEÑO DE ESCALERAS DE PECES

Dimensiones recomendadas para la escalera de peces en función del tamaño del pez.

Tamaño del pez (m)	Dimensiones del estanque (m)			Dimensión del orificio sumergido (m)		Escotadura lateral (m)		Caudal en el dispositivo (m ³ /s)	Salto máximo de agua (m)
	Longitud	Ancho	Profundidad del flujo	Ancho	Altura	Ancho	Altura		
	lb	b	h	bs	hs	ba	ha		
Mayor a 0.70	5 - 6	2.5 - 3	1.5 - 2	1.5	1	-	-	2.5	0.20
0.70 - 0.30	2.5 - 3	1.6 - 2	0.8 - 1.0	0.4 - 0.5	0.3 - 0.5	0.3	0.3	0.2 - 0.5	0.20
0.30 - 0.15	1.4 - 2	1.0 - 1.5	0.6 - 0.8	0.25 - 0.35	0.25 - 0.35	0.25	0.25	0.08 - 0.2	0.20
Menor a 0.15	> 1.0	> 0.8	> 0.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.05 - 0.1	0.20

[<< Regresar](#)

Figura 35 Ventana de tabla de dimensiones recomendadas para la escalera de peces en función del tamaño de pez.

Elaborado por: Barrera y Sanunga


5.2.4. VENTANA DE ESCALERA DE PECES TIPO HENDIDURA VERTICAL MODELO I

En la ventana encontramos dos cuadros principales, el de datos de entrada y el de parámetros de diseño. Los botones “Borrar”, “Calcular”, “Regresar” poseen las mismas funciones que realizaban en la ventana anterior. También podemos encontrar el botón “Calcular recomendaciones” el cual nos permite visualizar las dimensiones mínimas con las cuales se deberá partir en el dimensionamiento de las piscinas una vez ya ingresados los datos de la especie objetivo.

DISEÑO DE ESCALERAS DE PECES

DATOS DE ENTRADA

Especie objetivo



Largo : [m]

Ancho : [m]

Temperatura del agua : [°C]

Velocidad de nado : [m/s] Ábaco V-LC

Tiempo permanencia : [s] Ábaco Tp-LC

Cota aguas arriba : [msnm]

Cota aguas abajo : [msnm]

Caudal medio anual : [m3/s]

Salto de agua : [m] recomendado 0.20 m

Espesor del tabique : [m] mínimo 0.15 m

Ancho de la escotadura : [m] mínimo [m]

Largo del estanque : [m] mínimo [m]

Ancho del estanque : [m] mínimo [m]

Coefficiente de descarga : [(hu/ho)] Ábaco Ur

Nota: las recomendaciones dado por la literatura se colocarán a lado derecho en color azul

PARÁMETROS DE DISEÑO

Número de estanques : [-]

Altura mínima estanque (hu): [m]

Altura máxima estanque (ho): [m]

Altura media estanque : [m]

Velocidad en escotadura: [m/s]

Caudal en la escotadura: [m3/s]

Energía disipada: [W/m3] <= 200 W/m3

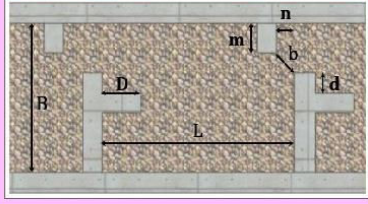
Longitud de la escalera: [m]

Pendiente: [%]

Caudal ecológico: [m3/s]

Distancia recorrida del pez: [m]

Datos geométricos



L = [m]

B = [m]

b = [m]

m = [m]

n = [m]

D = [m]

d = [m]

Condiciones a cumplir

Qescotadura > Qecológico

Vescotadura < Vnado

Distancia del pez > Largo del estanque

Calcular recomendaciones
Borrar
Calcular
<< Regresar

Figura 36 Ventana de escalera de peces tipo hendidura vertical. Modelo I.

Elaborado por: Barrera y Sanunga

En el primer cuadro encontramos los botones “Ábaco V-LC”, “Ábaco Tp-LC” y “Ábaco Ur” los cuales permiten el acceso a los ábacos ya mencionados y también al Abaco de coeficiente de descarga.


5.2.5. VENTANA DE ESCALERA DE PECES TIPO HENDIDURA VERTICAL MODELO II

Esta ventana posee los mismos botones que la ventana de escalera de hendidura vertical tipo I los cuales a su vez poseen las mismas funciones.

DISEÑO DE ESCALERAS DE PECES

DATOS DE ENTRADA

Especie objetivo



Largo: [m]
Ancho: [m]

Temperatura del agua: [°C]

Velocidad de nado: [m/s] Ábaco V-LC

Tiempo permanencia: [s] Ábaco Tp-LC

Cota aguas arriba: [msnm]

Cota aguas abajo: [msnm]

Caudal medio anual: [m3/s]

Salto de agua: [m] recomendado 0.20 m

Espesor del tabique: [m] mínimo 0.15 m

Ancho de la escotadura: [m] mínimo [m]

Largo del estanque: [m] mínimo [m]

Ancho del estanque: [m] mínimo [m]

Coefficiente de descarga: [(hu/ho)] Ábaco Ur

Nota: las recomendaciones dado por la literatura se colocarán a lado derecho en color azul

PARÁMETROS DE DISEÑO

Número de estanques:	[-]	Caudal en la escotadura:	[m3/s]
Altura mínima estanque (hu):	[m]	Energía disipada:	[W/m3] << 150 W/m3
Altura máxima estanque (ho):	[m]	Longitud de la escalera:	[m]
Altura media estanque:	[m]	Pendiente:	[%]
Velocidad en escotadura:	[m/s]	Caudal ecológico:	[m3/s]
Distancia recorrida del pez:	[m]		

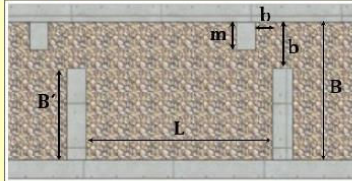
Condiciones a cumplir

Qescotadura > Qecológico

Vescotadura < Vnado

Distancia del pez > Largo del estanque

Datos geométricos



L = [m]
B = [m]
B' = [m]
b = [m]
m = [m]

Calcular recomendaciones
Borrar
Calcular diseño
<< Regresar

Figura 37 Ventana de escalera de peces tipo hendidura vertical. Modelo II.

Elaborado por: Barrera y Sanunga

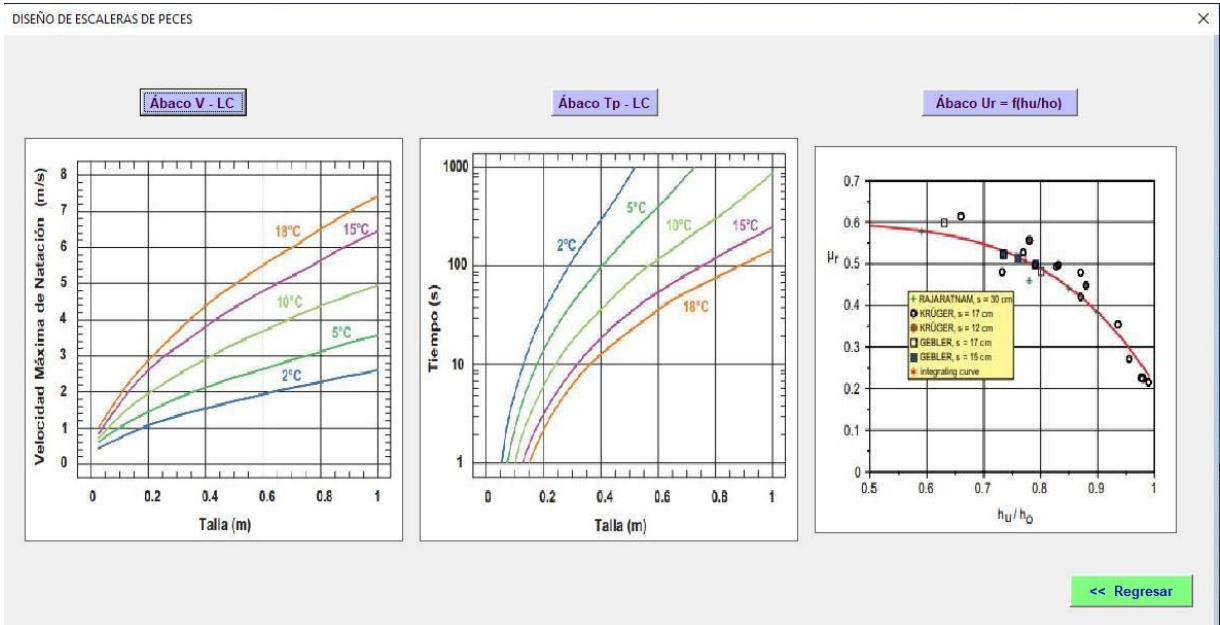


Figura 38 Ventana de los ábacos Velocidad máxima de nado – Longitud corporal, Tiempo de permanencia – Longitud corporal y Coeficiente de descarga (μ_r).

Elaborado por: Barrera y Sanunga

5.3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Para presentar la ejecución del programa se realiza un ejercicio práctico con los siguientes datos:

Estudio biológico de las especies acuáticas más relevantes: trucha y preñadilla.

Temperatura del agua: 15 °C.

Estudio hidrológico donde el caudal medio anual es: 4 m³/s.

Niveles aguas arriba: 20 msnm.

Niveles aguas abajo: 17 msnm.

5.3.1. CÁLCULO DEL EJEMPLO PRÁCTICO

5.3.1.1. Escalera de peces tipo estanques sucesivos

5.3.1.1.1. *Cálculo del caudal*

Para calcular el caudal a circular por la estructura se obtiene mediante la ecuación 19:

$$Q = 10\% Q_m$$

$$Q = 0.1 * 4 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 0.4 \text{ m}^3/\text{s}$$

5.3.1.1.2. Cálculo del número de estanques

La cantidad de estanques que se van a requerir para la escalera de peces se calcula con la ecuación 20:

$$N = \frac{H_{total}}{\Delta h} - 1$$

$$N = \frac{3}{0.20} - 1$$

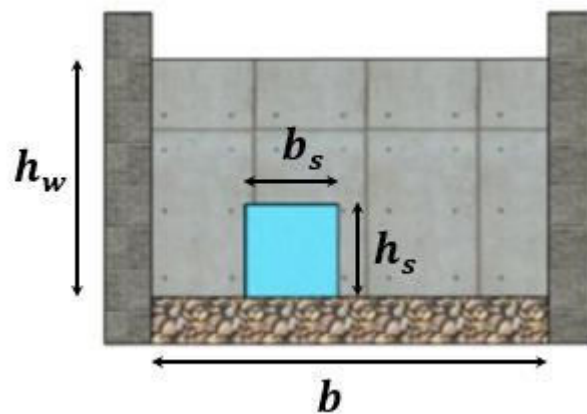
$$N = 14$$

5.3.1.1.3. Cálculo de las dimensiones del orificio

Para el dimensionamiento del orificio se emplea la ecuación (22).

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

Para el coeficiente de descarga se utiliza un intervalo recomendado entre 0.65 y 0.85, se escogerá un valor intermedio igual a 0.75.



$$Q = Q_o$$

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

$$A_s = \frac{0.4}{0.75(\sqrt{2 * 9.81 * 0.2})} = 0.269 \text{ m}^2$$

$$A_s = h_s * b_s$$

$$h_s = b_s$$

$$A_s = (b_s)^2$$

$$b_s = \sqrt{0.269}$$

$$b_s = 0.52 \text{ m}$$

Para calcular la velocidad en el orificio (V_o) se obtiene mediante la ecuación (27).

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

$$V_o = \frac{0.4}{0.269}$$

$$V_o = 1.49 \text{ m/s} \quad \leq 2 \text{ m/s OK}$$

5.3.1.1.4. Cálculo de las dimensiones del estanque

Para calcular el calado mínimo dentro del estanque se utiliza la ecuación (28) y (29):

$$h = LC + 0.25$$

$$h = 0.4 + 0.25$$

$$h = 0.65 \text{ m}$$

$$h_m = h + \frac{\Delta h}{2}$$

$$h_m = 0.65 + \frac{0.2}{2}$$

$$h_m = 0.75 \text{ m}$$

La DVWK (1996), recomienda dimensiones para el diseño de escaleras, las cuales se presentan en la tabla 14 según el tamaño del pez, la longitud del estanque se obtendrá con la ecuación (30).

$$E = \frac{\rho g \Delta h Q}{B_e h_m (L_e - e_t)}$$

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

$$L_e = \frac{1000 * 9.81 * 0.2 * 0.4}{1.9 * 0.75 * 150} + 0.15$$

$$L_e = 3.82 \text{ m}$$

La pendiente de la escalera de peces se calcula con la ecuación (31):

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

$$S = \frac{0.2}{3.82}$$

$$S = 0.0523$$

La longitud total de la escalera se obtiene mediante la ecuación (32).

$$LE_{total} = L_e * N$$

$$LE_{total} = 3.82 * 14$$

$$LE_{total} = 53.48 \text{ m}$$

La velocidad en la entrada se calcula mediante la ecuación (33), se

recomienda que este entre un intervalo de 0.8 a 2 m/s.

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

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

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

5.3.1.1.5. Cálculo de las dimensiones de la piscina de entrada y salida

Para obtener las dimensiones de la piscina se utiliza las ecuaciones (34), (35) y (36). Se recomienda que exista una rampa con un ángulo no mayor de 45°.

$$h_{piscina} = \frac{1}{3} \text{ ó } \frac{1}{2} * H_{total}$$

$$h_{piscina} = \frac{1}{2} * 3$$

$$h_{piscina} = 1.5 \text{ m}$$

$$L_{piscina} = 7 \text{ ó } 10 * H_{total}$$

$$L_{piscina} = 7 * 3$$

$$L_{piscina} = 21 \text{ m}$$

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

$$b_{piscina} = 1.9 + 1$$

$$b_{piscina} = 2.9 \text{ m}$$

5.3.1.1.6. Capacidades natatorias de la especie objetivo

El cálculo de la velocidad máxima de nado se utiliza el ábaco propuesto en la figura 20:

$$V_n = 3.8 \text{ m/s}$$

El tiempo de permanencia se obtendrá mediante el ábaco que se muestra en la figura 21.

$$t_p = 20 \text{ s}$$

Para estimar la distancia recorrida por el pez se utiliza lo propuesto en el subcapítulo 4.1, utilizando la ecuación (1).

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

$$D_r = (3.8 - 1.98) * 20 = 36.4 \text{ m}$$

Cumpliendo así con todas las condiciones de diseño:

$$E \leq 200 \text{ W/m}^3$$

$$5\% < \text{Pendiente} < 10\%$$

$$D_r < L$$

A continuación se muestran los resultados obtenidos por la MACRO, comprobando que se poseen los mismos valores.

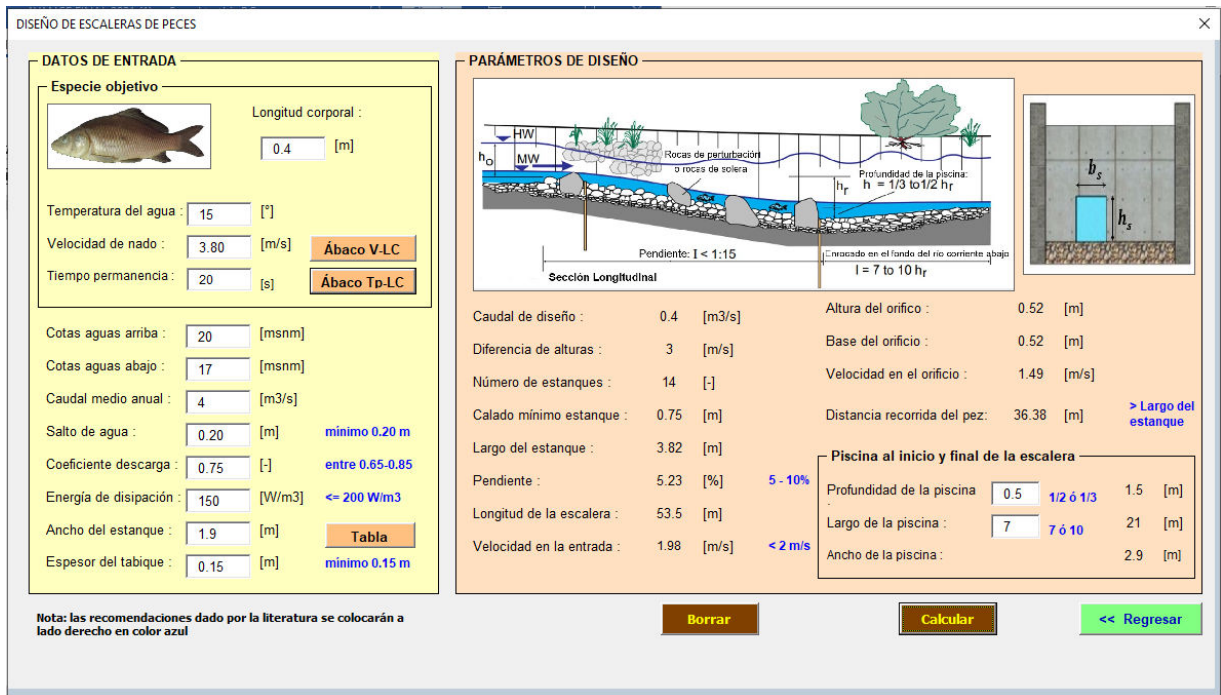


Figura 39 Resultados de la MACRO de la escalera de peces tipo estanques sucesivos.

Elaborado por: Barrera y Sanunga

5.3.1.2. Escalera de peces tipo hendidura vertical modelo I

5.3.1.2.1. Dimensionamiento del estanque

El ancho mínimo de la escotadura se obtiene mediante la ecuación (2) como se menciona en el capítulo 4.

$$b = 3 * W_{pez}$$

$$b = 3 * 0.1$$

$$b = 0.3 \text{ m}$$

El largo mínimo del estanque se calcula con la longitud corporal del pez, mediante la ecuación (3) obteniendo un valor mínimo:

$$L = 3 * L_{pez}$$

$$L = 3 * 0.4$$

$$L = 1.2 \text{ m}$$

El ancho del estanque posee una relación geométrica con el largo del mismo, el cual se determina con la ecuación (4), siendo un valor mínimo recomendado:

$$B = \frac{3}{4} * L$$

$$B = \frac{3}{4} * 1.2$$

$$B = 0.9 \text{ m}$$

Las relaciones geométricas para el direccionamiento del flujo en la escalera de peces tipo I son:

El bloque del deflector se calcula con la ecuación (5).

$$m = 1.36 * b$$

$$m = 1.36 * 0.3$$

$$m = 0.408 \text{ m}$$

La distancia escalonar se calculará con la ecuación (6).

$$n = 0.76 * b$$

$$n = 0.76 * 0.3$$

$$n = 0.228 \text{ m}$$

La longitud y ancho de proyección que está en función del ancho del estanque se obtienen mediante las ecuaciones (7) y (8)

$$D = 0.24 * B$$

$$D = 0.24 * 0.9$$

$$D = 2.16 \text{ m}$$

$$d = 0.086 * B$$

$$d = 0.086 * 0.9$$

$$d = 0.0774 \text{ m}$$

El número de estanques totales de la estructura se calculan con la ecuación (10):

$$N = \frac{H_{total}}{\Delta h} - 1$$

$$N = \frac{3}{0.2} - 1$$

$$N = 14$$

La altura mínima en los estanques se calcula con la ecuación (11) garantizando condiciones óptimas de nado:

$$h_u = L_{pez} + 0.25m$$

$$h_u = 0.4 + 0.25m$$

$$h_u = 0.65 m$$

La altura máxima del estanque se calculará con la ecuación (12):

$$h_o = h_u + \Delta h$$

$$h_o = 0.65 + 0.2$$

$$h_o = 0.85 m$$

La profundidad media del agua será esencial para el cálculo de la energía de disipación, se obtiene con la ecuación (13):

$$h_m = h_u + \frac{\Delta h}{2}$$

$$h_m = 0.65 + \frac{0.2}{2}$$

$$h_m = 0.75 \text{ m}$$

La velocidad máxima del flujo de agua dentro del estanque se obtiene mediante la ecuación (14):

$$V_{m\acute{a}x} = \sqrt{2g\Delta h}$$

$$V_{m\acute{a}x} = \sqrt{2 * 9.81 * 0.2}$$

$$V_{m\acute{a}x} = 1.98 \text{ m/s}$$

El caudal por transitar por la escotadura se calcula mediante la ecuación (19):

$$Q = \frac{2}{3} \mu_r b \sqrt{2g} h_o^{\frac{2}{3}}$$

$$Q = \frac{2}{3} * 0.51 * 0.3 * \sqrt{2 * 9.81} * 0.85^{\frac{2}{3}}$$

$$Q = 0.41 \text{ m}^3/\text{s}$$

El coeficiente de descarga μ_r se obtiene por medio del ábaco mostrado en la figura 28 que está en función de la altura máxima y mínima

$$\mu_r = 0.51$$

La energía de disipación dentro de la escalera depende de las especies que se encuentran y se la calcula por medio de la ecuación (16):

$$E = \frac{\rho g \Delta h Q}{B h_m (L - e_t)}$$

$$E = \frac{1000 * 9.81 * 0.2 * 0.41}{0.9 * 0.75 (1.2 - 0.15)}$$

$$E = 1122.28 \text{ W/m}^3$$

Al poseer una energía de disipación mucho más alta que 200 W/m^3 , valor recomendado por la literatura técnica, se decide aumentar los tamaños de las dimensiones del estanque y el ancho también de la escotadura ya que el caudal que circula por la escalera es muy cercano al caudal ecológico.

$$b = 0.5 \text{ m}$$

$$L = 4 \text{ m}$$

$$B = 2.5 \text{ m}$$

Con estas nuevas dimensiones se recalculan los nuevos valores de las dimensiones del estanque siguiendo el proceso anterior, obteniendo los siguientes resultados:

$$m = 0.68 \text{ m}$$

$$n = 0.38 \text{ m}$$

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

$$d = 0.21 \text{ m}$$

$$Q = 0.68 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$E = 183.65 \text{ W/m}^3$$

5.3.1.2.1. Capacidades natatorias de la especie objetivo

Para el cálculo de la velocidad máxima de nado se utiliza el ábaco propuesto en la figura 20:

$$V_n = 3.8 \text{ m/s}$$

El tiempo de permanencia se obtiene mediante el ábaco que se muestra en la figura 21.

$$t_p = 20 \text{ s}$$

Para estimar la distancia recorrida por el pez se utiliza lo propuesto en el subcapítulo 4.1, utilizando la ecuación (1).

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

$$D_r = (3.8 - 1.98) * 20$$

$$D_r = 36.38 \text{ m}$$

Cumpliendo así con todas las condiciones de diseño:

$$E \leq 200 \text{ W/m}^3$$

$$V_{max} < V_n$$


$$D_r < L$$

A continuación se muestran los resultados obtenidos por la MACRO, comprobando que se poseen los mismos valores.

DISEÑO DE ESCALERAS DE PECES

DATOS DE ENTRADA

Especie objetivo



Largo : 0.40 [m]
Ancho : 0.10 [m]

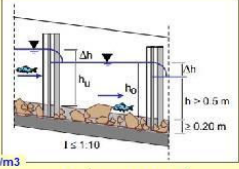
Temperatura del agua : 15 [°]
Velocidad de nado : 3.80 [m/s] **Ábaco V-LC**
Tiempo permanencia : 20 [s] **Ábaco Tp-LC**

Cota aguas arriba : 20 [msnm]
Cota aguas abajo : 17 [msnm]
Caudal medio anual : 4 [m3/s]
Salto de agua : 0.20 [m] **recomendado 0.20 m**
Espesor del tabique : 0.15 [m] **minimo 0.15 m**
Ancho de la escotadura : 0.5 [m] **minimo 0.3 [m]**
Largo del estanque : 4.0 [m] **minimo 1.2 [m]**
Ancho del estanque : 2.5 [m] **minimo 0.9 [m]**
Coeficiente de descarga : 0.51 [(hu/ho)] **0.76** **Ábaco Ur**

Nota: las recomendaciones dado por la literatura se colocarán a lado derecho en color azul

PARÁMETROS DE DISEÑO

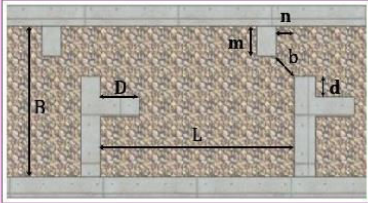
Número de estanques : 14 [-]
Altura mínima estanque (hu): 0.65 [m]
Altura máxima estanque (ho): 0.85 [m]
Altura media estanque : 0.75 [m]
Velocidad en escotadura: 1.98 [m/s]
Caudal en la escotadura: 0.68 [m3/s]
Energía disipada: 183.65 [W/m3] **<= 200 W/m3**
Longitud de la escalera: 56 [m]
Pendiente: 3.57 [%]
Caudal ecológico: 0.4 [m3/s]
Distancia recorrida del pez: 36.38 [m]



Condiciones a cumplir

Qescotadura > Qecológico **Ok**
Vescotadura < Vnado **Ok**
Distancia del pez > Largo del estanque **Ok**

Datos geométricos



L = 4 [m]
B = 2.5 [m]
b = 0.5 [m]
m = 0.68 [m]
n = 0.38 [m]
D = 0.6 [m]
d = 0.21 [m]

Calcular recomendaciones **Borrar** **Calcular** **<< Regresar**

Figura 40 Resultados de la MACRO de la escalera de peces tipo hendidura vertical modelo I.

Elaborado por: Barrera y Sanunga

5.3.1.3. Escalera de peces tipo II hendidura vertical

5.3.1.3.1. Dimensionamiento del estanque

El ancho mínimo de la escotadura se obtiene mediante la ecuación (2) como se menciona en el capítulo 4.

$$b = 3 * W_{pez}$$

$$b = 3 * 0.08$$

$$b = 0.24 \text{ m}$$

El largo mínimo del estanque se calculara con la longitud corporal del pez, mediante la ecuación (3) obteniendo un valor mínimo:

$$L = 3 * L_{pez}$$

$$L = 3 * 0.25$$

$$L = 0.75 \text{ m}$$

El ancho del estanque posee una relación geométrica con el largo de este, el cual se obtiene con la ecuación (4), siendo un valor mínimo recomendado:

$$B = \frac{3}{4} * L$$

$$B = \frac{3}{4} * 0.75$$

$$B = 0.56 \text{ m}$$

Las relaciones geométricas para el direccionamiento del flujo en la escalera de peces tipo II son:

El bloque del deflector se calculará con la ecuación (5).

$$m = 0.5 * b$$

$$m = 0.5 * 0.24$$

$$m = 0.12 \text{ m}$$

El número de estanques totales de la estructura se calcula con la ecuación (10):

$$N = \frac{H_{total}}{\Delta h} - 1$$

$$N = \frac{3}{0.2} - 1$$

$$N = 14$$

La altura mínima en los estanques se obtiene con la ecuación (11) garantizando condiciones óptimas de nado:

$$h_u = L_{pez} + 0.25m$$

$$h_u = 0.25 + 0.25m$$

$$h_u = 0.5 \text{ m}$$

La altura máxima del estanque se calcula con la ecuación (12):

$$h_o = h_u + \Delta h$$

$$h_o = 0.5 + 0.2$$

$$h_o = 0.75 \text{ m}$$

La profundidad media del agua es esencial para el cálculo de la energía de disipación, se obtiene con la ecuación (13):

$$h_m = h_u + \frac{\Delta h}{2}$$

$$h_m = 0.5 + \frac{0.2}{2}$$

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

La velocidad máxima del flujo de agua dentro del estanque se obtiene mediante la ecuación (14):

$$V_{m\acute{a}x} = \sqrt{2g\Delta h}$$

$$V_{m\acute{a}x} = \sqrt{2 * 9.81 * 0.2}$$

$$V_{m\acute{a}x} = 1.98 \text{ m/s}$$

El caudal por transitar por la escotadura se calcula mediante la ecuación (19):

$$Q = \frac{2}{3} \mu_r b \sqrt{2g} h_o^{\frac{2}{3}}$$

$$Q = \frac{2}{3} * 0.54 * 0.24 * \sqrt{2 * 9.81} * 0.75^{\frac{2}{3}}$$

$$Q = 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$$

El coeficiente de descarga μ_r se obtiene por medio el ábaco mostrado en la figura 28 que está en función de la altura máxima y mínima

$$\mu_r = 0.54$$

La energía de disipación dentro de la escalera depende de la especie y se la calcula por medio de la ecuación (16):

$$E = \frac{\rho g \Delta h Q}{B h_m (L - e_t)}$$

$$E = \frac{1000 * 9.81 * 0.2 * 0.3}{0.9 * 0.6 (0.75 - 0.15)}$$

$$E = 2936.32 \text{ W/m}^3$$

Al poseer una energía de disipación mucho más alta que 150 W/m^3 , valor recomendado por la literatura técnica, se decide aumentar los tamaños de las dimensiones del estanque y el ancho también de la escotadura ya que el caudal que circula por la escalera es menor al caudal ecológico.

$$b = 0.5 \text{ m}$$

$$L = 5 \text{ m}$$

$$B = 3 \text{ m}$$

Con estas nuevas dimensiones se recalculan los nuevos valores de las dimensiones del estanque siguiendo el proceso anterior, obteniendo los siguientes resultados:

$$m = 0.25 \text{ m}$$

$$b = 0.5 \text{ m}$$

$$B' = 2.5$$

$$Q = 0.63 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$E = 141.27 \text{ W/m}^3$$

5.3.1.3.2. Capacidades natatorias de la especie objetivo

El cálculo de la velocidad máxima de nado se utiliza el ábaco propuesto en la figura 20:

$$V_n = 3 \text{ m/s}$$

El tiempo de permanencia se obtiene mediante el ábaco que se muestra en la figura 21.

$$t_p = 20 \text{ s}$$

Para estimar la distancia recorrida por el pez se utiliza lo propuesto en el subcapítulo 4.1, utilizando la ecuación (1).

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

$$D_r = (3 - 1.98) * 20$$

$$D_r = 5.1 \text{ m}$$

Cumpliendo así con todas las condiciones de diseño:

$$E \leq 200 \text{ W/m}^3$$

$$V_{max} < V_n$$


$$D_r < L$$

A continuación se muestran los resultados obtenidos por la MACRO, comprobando que se poseen los mismos valores.

DISEÑO DE ESCALERAS DE PECES

DATOS DE ENTRADA

Especie objetivo



Largo : 0.25 [m]

Ancho : 0.08 [m]

Temperatura del agua : 15 [°]

Velocidad de nado : 3.0 [m/s] Ábaco V-LC

Tiempo permanencia : 5.0 [s] Ábaco Tp-LC

Cota aguas arriba : 20 [msnm]

Cota aguas abajo : 17 [msnm]

Caudal medio anual : 4.0 [m³/s]

Salto de agua : 0.20 [m] recomendado 0.20 m

Espesor del tabique : 0.15 [m] mínimo 0.15 m

Ancho de la escotadura : 0.50 [m] mínimo 0.24 [m]

Largo del estanque : 5 [m] mínimo 0.75 [m]

Ancho del estanque : 3 [m] mínimo 0.56 [m]

Coefficiente de descarga : 0.54 [(hu/ho)] 0.71 Ábaco Ur

Nota: las recomendaciones dado por la literatura se colocarán a lado derecho en color azul

PARÁMETROS DE DISEÑO

Número de estanques :	14 [-]	Caudal en la escotadura:	0.63 [m ³ /s]
Altura mínima estanque (hu):	0.5 [m]	Energía disipada:	141.27 [W/m ³] ← 150 W/m³
Altura máxima estanque (ho):	0.7 [m]	Longitud de la escalera:	70 [m]
Altura media estanque :	0.6 [m]	Pendiente:	2.86 [%]
Velocidad en escotadura:	1.98 [m/s]	Caudal ecológico:	0.4 [m ³ /s]
Distancia recorrida del pez:	5.1 [m]		

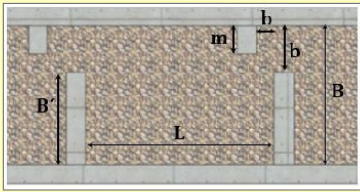
Condiciones a cumplir

Qescotadura > Qecológico Ok

Vescotadura < Vnado Ok

Distancia del pez > Largo del estanque Ok

Datos geométricos



L =	5 [m]
B =	3 [m]
B' =	2.5 [m]
b =	0.5 [m]
m =	0.25 [m]

Calcular recomendaciones
Borrar
Calcular diseño
<< Regresar

Figura 41 Resultados de la MACRO de la escalera de peces tipo hendidura vertical modelo II.

Elaborado por: Barrera y Sanunga

CAPITULO 6

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1. CONCLUSIONES

- Existe una gran variación de caudales entre los diferentes ríos del Ecuador, debido a esto el diseño de obras hidráulicas en el país también es variado, partiendo de esto se debe tener presente que pueden existir casos en donde los diseños presentados en este trabajo de investigación no sean los más eficientes o ideales, pero si buscan adaptarse a la mayoría de los casos presentes en el Ecuador.
- El diseño final de una escalera de peces no puede ser automatizado por completo, debido a que las condiciones topográficas y de espacio son únicas para cada caso.
- La capacidad de implementar giros y curvas en la trayectoria de las escaleras de peces escogidas de una manera libre sin verse afectadas las condiciones de diseño dentro de ellas, hacen que su aplicación pueda ser más amplia en los diseños de obras hidráulicas.
- La ubicación de la escalera de peces es el factor más importante del diseño de esta estructura, ya que a pesar de que las condiciones dentro de la estructura sean favorables para el tránsito de las especies, si ellos no son capaces de encontrar la entrada no podrán hacer uso de ella.

- La ubicación de la salida de los peces también es de gran importancia, tal como su entrada, ya que los peces necesitan una zona sin altas velocidades para poder reincorporarse al cauce natural sin recibir ningún tipo de desorientación.
- La capacidad de nado de los peces está ligado principalmente a su tamaño y temperatura del agua, pero el tipo de especie también influye en dichas capacidades por lo que los ábacos implementados en el cálculo podrían recibir cambios con investigaciones futuras.
- La longitud corporal de la especie objetivo es una variable importante ya que el diseño de la escalera de peces depende primordialmente de este valor.
- El diseño de una escalera de peces depende principalmente del tipo de peces que habitan en el río, por tal motivo es completamente necesario realizar estudios de la ictiofauna antes de realizar cualquier tipo de diseño.
- La selección de los dos tipos de escaleras de peces se basó principalmente en las similitudes hidráulicas que presentan las estructuras, además por ser las más implementadas a nivel de Sudamérica y países europeos ya que los demás tipos de escaleras tienen mayor costo en su construcción y su utilización es mínima.
- El tener diseños que mantengan las mismas condiciones hidráulicas a lo largo de toda su estructura facilita la determinación de si esta estructura cumple o no las condiciones requeridas para que los peces puedan ser capaces de atravesarla.
- Los dos tipos de escaleras de peces poseen orificios, vertederos o hendiduras, por lo que la limpieza permanente garantizará un funcionamiento óptimo de

estas estructuras, conservando así las condiciones hidráulicas calculadas por las macros.

- La información que se ha obtenido basada en experimentaciones permite entender como interfiere el caudal ecológico, garantizando que la especie atraviese la estructura y proporcionar un equilibrio ecológico entre el entorno y el medio ambiente.
- Se estableció criterios y una base de diseño para cada tipo de escalera seleccionada, el cual ayudo a la realización de la herramienta de forma educativa y a su vez didáctica, su interfaz es entendible y sintetiza la información recolectada.
- La herramienta que se ha generado en este proyecto de titulación permite tener una mayor perceptibilidad del diseño de las escaleras de peces seleccionadas, ya que se toma en cuenta varias recomendaciones que se mencionan en la literatura técnica, la cual está sujeta a cambios posteriores ya que en la actualidad la implementación de este tipo de estructuras permite preservar las especies acuáticas presentes en el río.
- La utilización de la herramienta (MACRO) presentada para el diseño de las escaleras de peces permite reducir considerablemente el tiempo de diseño, facilitando así el trabajo y esfuerzo que el diseñador debería emplear.

6.2. RECOMENDACIONES

- Es recomendable colocar vertederos de exceso al inicio de las escaleras de peces, permitiendo así un caudal constante dentro de la misma, a pesar de que

las velocidades no se ven afectadas por una posible variación de caudal si se han notado pequeños cambios en la turbulencia dentro de ella cuando el caudal aumenta.

- Se recomienda realizar un estudio de la ictiofauna en los ríos, realizando así una clasificación de todas las especies que ahí habitan, posteriormente se puede diseñar la escalera de peces para la especie de mayor relevancia tomando siempre en cuenta las especies más pequeñas ya que esta tendrá una menor capacidad natatoria.
- Es recomendable tener un salto de 0.20 m como máximo, para que los diseños de los diferentes tipos de escaleras no presenten aguas abajo variabilidades excesivas en la turbulencia y en el comportamiento de la especie.
- Se recomienda que la energía de disipación sea menor a 200 W/m^3 para salmónidos y 180 W/m^3 para no salmónidos, esto permite garantizar una mejor funcionalidad de la estructura claro que esto también varía según la especie ya que puede existir especies que pueden permitir una disipación de energía de hasta 400 W/m^3 .
- Para los diseños se recomienda tablas de las dimensiones de las escaleras de peces que dependen de la longitud corporal del pez, las medidas pueden ser variables de especie a especie y se puede comprobar el comportamiento de una respecto a la otra especie.
- Los costos de construcción siempre serán una limitante para cualquier tipo de diseño, por ello es aconsejable analizar el presupuesto que se posee, ya que para presas de gran altura se requerirán escaleras de gran tamaño, incrementando así el costo de inversión del proyecto.

6.3. TRABAJOS FUTUROS

- Se recomienda realizar un estudio más detallado de las capacidades natatorias de los peces que existen en nuestro país, permitiendo así afinar de mejor manera las distintas curvas del nado de los peces y obtener velocidades más cercanas a la realidad ya que las utilizadas en la actualidad están ligadas al tamaño del pez y la temperatura del agua.
- Realizar estudios de eficiencia del sistema de transferencia de peces, debido a la poca atracción al ingreso de la escalera de peces y los problemas de diseño que incide en su eficiencia ya que muchos de los diseños están basados principalmente de estudios o experimentación realizada en países extranjeros como Estados Unidos o España los cuales son pioneros en este tipo de estructura.
- Es recomendable realizar un estudio bibliográfico de los diferentes tipos de escaleras de peces y también se recomienda realizar una modelación física de las escaleras de peces, para conocer el comportamiento de los peces dentro de dichas estructuras mediante video o insertando algún dispositivo dentro de la especie.

CAPITULO 7

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aigoui, F., Dufour, M., Isidoro, G., Leblond, D., Albin, C., Antonic, L., ... Bruyn, B. De. (2008). Guide passes à poissons. *Voies Navigables de France , Tech. Rep., Voies Navigables de France, División Restauration et Développement Du Réseau.*
- Alonso, M., & Aparicio, E. (2011). *Evaluación de la efectividad de la escala de peces del azud del río Ebro en Xerta (Tarragona).* Ebro.
- Arias, V. (2012). Los caudales ecológicos en el Ecuador: análisis institucional y legal. In *Centro Ecuatoriano de Derecho Ambiental* (Vol. 24). Retrieved from <http://191.98.188.189/Fulltext/15663.pdf>
- Asamblea Nacional Constituyente, R. D. E. (2014). Ley Orgánica De Recursos Hídricos, Usos Y Aprovechamiento Del Agua. *Registro Oficial*, 32.
- Baigún, C., Oldani, N., & Van Damme, P. (2011). Represas hidroeléctricas en América Latina y su impacto sobre la ictiofauna: Lecciones aprendidas. *Los Peces y Los Delfines de La Amazonía Boliviana*, 397–416. Retrieved from <http://www.faunagua.org/biblioteca/3Cap16.pdf>
- Bainbridge, R. (1960). Speed and stamina in three fish. *Journal of Experimental Biology*, 37, 129–153.
- Bermúdez, M. (2013). *Evaluación hidráulica y biológica de diseños de escalas de peces de hendidura vertical para especies de baja capacidad natatoria.* UNIVERSIDADE DA CORUÑA.

- Chamba, C. (2015). *Actualización Del Estudio De Impacto Ambiental Del Proyecto Hidroeléctrico Delsitanisagua 116 Mw a 180 Mw*. 307.
- Champutiz, H. (2013). Bases De Diseño De Escaleras Para Peces. *Universidad Central Del Ecuador*, 209.
- CHD. (2016). *Manual para la evaluación de la funcionalidad de pasos para peces de estanques sucesivos. Metodología AEPS (1.0)*. 139.
- Clay, C. H. (1995). *Design of Fishways and Other Fish Facilities*. Lewis Publishers.
- Del Olmo Carrasco, R. (2015). *Grado en Ingeniería Forestal y del Medio natural Proyecto de paso para peces sobre el azud del puente del ferrocarril de Burgos (Río Arlanzón) Tutor : Francisco Javier Sanz Ronda*.
- DVWK. (1996). Fish Passes: Design, Dimensions and Monitoring (DE). In *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- Ecotono Consultores. (2018). *MONITOREO BIÓTICO DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO NORMANDÍA PRIMER SEMESTRE AÑO 2018*.
- Efficãcitas Consultora Cía. (2009). *Estudio de Impacto Ambiental Definitivo Proyecto Hidroeléctrico COCA CODO SINCLAIR. Resumen Ejecutivo*. Retrieved from <http://www.cocasinclair.com/web/cocasinclair/licitaciones>
- Elvira, B., Nicola, G., Almodóvar, A., Doadrio, I., Perdices, A., & Velasco, J. C. (1995). Impacto de las obras hidráulicas en la ictiofauna y medidas correctoras. In *Conservación de Especies Amenazadas*. Retrieved from <http://www.magrama.gob.es/va/biodiversidad/temas/conservacion-de-especies->

amenazadas/vertebrados/obras_hidraulicas.aspx

Enerjubones. (2011). *ESTUDIO DE FACTIBILIDAD Y DISEÑO DEFINITIVO DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO MINAS ALTERNATIVA SAN FRANCISCO Y ESTUDIO DE FACTIBILIDAD Y DISEÑO DEFINITIVO DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO LA UNIÓN*. Azuay.

FAO. (2002). Fish Passes: Design, Dimensions and Monitoring (DE). In *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Roma: FAO.

Froese, R., & Pauly, D. (2019). FishBase. Retrieved from Editores website: www.fishbase.org, versión (12/2019)

Fuentes, J. F. (2017). *Modelización hidráulica de pasos para peces ante diferentes escenarios*. Universidad de Valladolid.

Hammer, C. (1995). Fatigue and exercise tests with fish. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 112 (1), 1–20. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/0300-9629\(95\)00060-K](https://doi.org/10.1016/0300-9629(95)00060-K)

Hidropaute S.A. (2006). *Estudios De Impacto Ambiental Definitivos (Eiad) Informe Final*.

Hidropaute S.A. (2007). *ACTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO PAUTE-SOPLADORA*. Cuenca.

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2013). *Anuario Hidrológico*. Quito.

Jiménez, P., Aguirre, W., Laaz, E., Navarrete, R., Nugra, F., Rebolledo, E., ...

Valdiviezo, J. (2015). *Guía de peces para aguas continentales en la vertiente occidental del Ecuador*.

Larinier, M. (1998). *Upstream and downstream fish passage experience in France*. Oxford: Fishing News Books.

Martínez de Azagra, A. (1999). Escalas para peces. *Publicaciones E.T.S.II.AA. Universidad de Valladolid*, 26(May 1999), 1–36.
<https://doi.org/10.13140/2.1.3136.5441>

Myrick, C. A., & Cech, J. J. (2000). Swimming performances of four California stream fishes: temperature effects. *Environmental Biology of Fishes*, 58, 289–295.

Odeh, M., Noreika, J. F., Haro, A., Maynard, A., Castro-Santos, T., & Cada, G. F. (2002). Evaluation of the Effects of Turbulence on the Behavior of Migratory Fish. *U.S. Geological Survey, Glenn F. Report to Bonneville Power Administration (BPA Report DOE/ BP-00000022-1)*, 55.

Oyola, T. (2017). *PROPUESTA METODOLÓGICA PARA ESTIMACIÓN DE CAUDAL ECOLÓGICO EN FUENTES SUPERFICIALES*. UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA.

Pena, L., Puertas, J., Miguelez, M., Balairón, L. J., Lara, Á., & Aramburu, E. (2010). Aplicación informática para el diseño de escalas de peces de hendidura vertical. *Tema D Estructuras Hidráulicas*, 9.

Raviolo, A. (2002). Hojas de cálculo en clases de ciencia/ Spreadsheets in class of Science. *Journal of Science Education*, 100–102.

- Rojas, D. R., & Tarambis, H. D. (2012). *Bases de diseño de estructuras en diques transversales para la captación y tránsito del caudal ecológico*. 236.
- Sanz, F., Bravo, F., Fuentes, F., Ruiz, J., García, A., Ramos, N., ... Martínez de Azagra, A. (2013). *PASOS PARA PECES: escalas y otros dispositivos de paso*. Valladolid.
- Schmutz, S., & Mielach, C. (2013). *Measures for ensuring fish migration at transversal structures*. 1–52.
- Tractebel Caminosca Asociados. (2011). *Estudios de prefactibilidad y factibilidad de los proyectos hidroeléctricos Chirapi-Manduriacu*.
- Valbuena, J. (2015). *Métodología para la evaluación de paso para peces de estanques sucesivos*.
- Vide, J. P. M. (2003). *Ingeniería de ríos*. Barcelona: Ediciones Universida Politécnica de Cataluña.
- Videler, J. J. (1993). *Fish swimming*. London: Fish & Fisheries Series 10.
- Wang, R. (2008). *Aspects of Design and Monitoring of Nature Like Fish Passes and Bottom Ramps*. Universidad Técnica de Munich.
- Weaver, C. R. (1963). Influence of water velocity upon orientation and performance of adult migrating salmonids. *Fishery Bulletin Fish Wildlife Service U.S.*, 63(1).
- Webb, P. W. (1975). Hydrodynamics and energetics of fish propulsion. *Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada* 190.

ANEXOS

