

**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**Profesor Patrocinante:** Álvaro Suazo Schwencke

**DISEÑO PRELIMINAR DE OBRAS DE PASO  
PARA PECES ENDÉMICOS EN UNA CENTRAL  
HIDROÉLECTRICA DE PASADA DE LA CUENCA  
DEL ITATA**

PROYECTO DE TÍTULO PRESENTADO EN CONFORMIDAD A LOS REQUISITOS PARA  
OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**GONZALO VÁSQUEZ SANDOVAL**

**Concepción, febrero del 2020**

*Dedicado a cada una de las personas que  
me dieron su apoyo  
en este proceso:*

*Mi madre, Marta Sandoval P.*

*Mi padre, Pedro Vásquez R.*

*Mis Tíos, Miguel Campos R*

*E Hilda Vásquez R.*

## ***Agradecimientos***

*Ser ingeniero es uno de los más grandes anhelos que poseo desde pequeño, lograr llevar a cabo este propósito no ha sido fácil. Emigrar del campo a la ciudad significó un gran cambio y sacrificio, tanto para mi familia como para mí. Sin embargo, cada sacrificio tiene su recompensa y espero seguir luchando para lograr cada uno de mis objetivos.*

*Primeramente, doy gracias a Dios por la fuerza que me entrega día a día y por haberme dado la oportunidad de formar parte de esta Universidad.*

*Agradezco a mis padres y hermanos, por apoyarme siempre en este camino e inculcarme desde niño principios y valores.*

*Agradezco de forma muy especial a mis tíos Miguel e Hilda, por acogerme en su hogar durante estos años y hacerme sentir siempre como en casa.*

*Agradezco a mis amigos por los momentos vividos.*

*Agradezco a mi polola Patricia, por su apoyo incondicional y ser un pilar fundamental durante este último año.*

*Agradezco al grupo de docentes que formaron parte de mi aprendizaje, pues su labor, entrega y cercanía hicieron más ameno el aprendizaje en esta Universidad, principalmente, a mi profesor patrocinante, Dr. Álvaro Suazo, por su apoyo y comprensión durante el desarrollo del presente proyecto.*

**INDICE**

1. INTRODUCCIÓN .....	3
1.1. Justificación del tema.....	4
1.2. Objetivo General.....	5
1.3. Objetivos Específicos .....	5
2. ESTADO DEL ARTE.....	6
2.1. Fauna íctica de Chile.....	6
2.2. Pasos para peces.....	6
2.2.1. Restricciones de diseño .....	7
2.2.2. Requisitos generales de diseño.....	8
2.2.3. Tipología de pasos.....	11
3. METODOLOGÍA .....	12
3.1. Caracterización de caso en estudio .....	12
3.1.1. Características de barrera transversal .....	12
3.1.2. Caudal disponible y niveles de agua .....	13
3.1.3. Topografía del sitio .....	15
3.2. Definición y caracterización de fauna íctica.....	15
3.3. Definición de criterios de diseño y dimensionamiento de paso para peces .....	16
3.3.1. Paso natural .....	17
3.3.2. Paso técnico.....	19
3.4. Análisis de factibilidad funcional y económica .....	20
3.4.1. Factibilidad funcional.....	20
3.4.2. Factibilidad económica .....	21
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	21
4.1. Fauna íctica .....	21
4.1.1. Especies objetivo.....	22
4.1.2. Tamaños de peces nativos .....	23
4.1.3. Preferencia de hábitat .....	24
4.1.4. Capacidad de natación.....	26
4.2. Criterios de diseño y dimensionamiento de paso para peces .....	27
4.2.1. Selección de alternativas .....	27
4.2.2. Diseño de pase tipo natural .....	29

4.2.3. Diseño de pase tipo técnico.....	32
4.3. Análisis de factibilidad funcional y económica.....	33
4.3.1. Factibilidad funcional.....	33
4.3.2. Factibilidad económica.....	34
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	35
5.1. Conclusiones.....	35
5.2. Recomendaciones.....	36
REFERENCIAS.....	37
ANEXOS.....	42
ANEXO A: CARACTERIZACIÓN DE PHMA.....	42
ANEXO B: CARACTERIZACIÓN DE ESPECIES OBJETIVO.....	42
ANEXO C: TIPOS DE PASOS PARA PECES Y CRITERIOS DE DISEÑO.....	42
ANEXO D: DIMENSIONAMIENTO DE PASOS PARA PECES.....	42
ANEXO E: ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD FUNCIONAL Y ECONÓMICA.....	42

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características de la barrera transversal en PHMA.....	13
Tabla 2: Niveles de agua en barrera transversal.....	14
Tabla 3a: Fórmulas para cálculo del flujo, Darcy-Weisbach con coeficiente de resistencia determinado según Rouvé, 1987.....	17
Tabla 3b. Fórmulas para cálculo del flujo, Baki et al., 2016.....	18
Tabla 4: Especies de fauna íctica presentes en área de estudio.....	22
Tabla 5: Características de especies objetivo.....	22
Tabla 6: Tamaños de especies nativas presentes en área de estudio.....	23
Tabla 7: Compatibilidad de pasos para peces .....	27
Tabla 8. Criterios generales de diseño.....	28
Tabla 9: Dimensiones de río artificial.....	29
Tabla 10: Dimensiones de ranura vertical.....	31
Tabla 11: Análisis de factibilidad funcional de pasos para peces diseñados.....	32
Tabla 12: Análisis de factibilidad económica de pasos para peces diseñados.....	33

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de Proyecto Hidroeléctrico Molinos de Agua (PHMA).....	12
Figura 2. Caudal pasante río Cholguán.....	14
Figura 3. Caracterización de especies de peces objetivo.....	15
Figura 4. Análisis de factibilidad funcional.....	20
Figura 5.a CPH profundidad especies objetivo.....	24
Figura 5.b CPH velocidad de flujo especies objetivo.....	24
Figura 5.c CPH sustrato especies objetivo.....	25
Figura 6. Capacidad de natación especies objetivo	26
Figura 7. Distribución en planta (A) y transversal (B) de cantos rodados en río artificial.....	30
Figura 8. Sección transversal piscina de descanso río artificial.....	30

## **DISEÑO PRELIMINAR DE OBRAS DE PASO PARA PECES ENDÉMICOS EN UNA CENTRAL HIDROÉLECTRICA DE PASADA DE LA CUENCA DEL ITATA**

**Autor: Gonzalo Vásquez Sandoval**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo Electrónico: [gonzalo.vasquez1401@alumnos.ubiobio.cl](mailto:gonzalo.vasquez1401@alumnos.ubiobio.cl)

**Profesor Patrocinante: Álvaro Suazo Schwencke**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo Electrónico: [asuazo@ubiobio.cl](mailto:asuazo@ubiobio.cl)

### **Resumen**

Los peces dulceacuícolas endémicos de Chile poseen gran riesgo de conservación, a causa de impactos generados por diversas actividades antrópicas, una de las más relevantes es la segregación del hábitat fluvial producto del emplazamiento de estructuras transversales. Frente a esto, en Chile, los pasos para peces surgen como una de las posibles medidas de mitigación. Sin embargo, existen incertezas en su diseño, dado que la mayoría de los pasos para peces se han desarrollado en el hemisferio norte y están orientados a asistir a grandes peces migratorios. La realidad local es muy diferente, donde los peces se caracterizan por ser de tamaño pequeño y no migratorios. El presente proyecto título tiene como objetivo proponer diseños de obras de paso para peces que permitan satisfacer las necesidades que requieren los peces endémicos presentes en el río Cholguán. Para concretar este proyecto, se realizó un análisis de las recomendaciones otorgadas por diversas guías de diseño extranjeras. Junto con esto, se evaluaron las capacidades y comportamiento de los peces de interés, con el fin de extrapolar los criterios de diseño a estos. Luego, se realizaron dos alternativas de diseño de paso para peces considerando los criterios obtenidos. Finalmente, se evaluaron los diseños propuestos desde el punto de vista funcional y económico, logrando encontrar que la mejor alternativa que se ajusta al caso en estudio es un paso para peces tipo río artificial.

Palabras claves: Paso para peces, Peces endémicos, Río Cholguán.

7.881 Palabras Texto + 13 Tablas\*250 + 10 Figuras\*500= 16.131



## **PRELIMINARY DESIGN OF FISH STEPS FOR ENDEMIC FISHES IN A RIVER HYDROPOWER STATION IN ITATA BASIN**

**Author: Gonzalo Vásquez Sandoval**

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío Bío

Email: [gonzalo.vasquez1401@alumnos.ubiobio.cl](mailto:gonzalo.vasquez1401@alumnos.ubiobio.cl)

**Advisor: Álvaro Suazo Schwencke**

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío Bío

Email: [asuazo@ubiobio.cl](mailto:asuazo@ubiobio.cl)

### **Abstract**

Endemic freshwater fish of Chile have a high conservation risk, due to impacts generated by various anthropic activities. One of the most relevant impact is the segregation of the river habitat resulting from the location of a transversal structure. Against this, in Chile, the fish passage emerges as one of the possible mitigation measures. There are uncertainties in the design of fish steps, since most of the steps for fish have been developed in the northern hemisphere and are designed to assist large migratory fish. There is a very different local reality, where the native fish size is small and don't migrate. The purpose of this title project is to propose designs of fish steps which meet the needs required by the endemic fish present in the Cholguán river. To specify this project, an analysis of the recommendations granted by various foreign design guides was carried out. Along, the capacities and behavior of the fish of interest were evaluated, in order to extrapolate the design criteria to the site of interest. Then, two step design alternatives for fish were made considering the criteria obtained. Finally, the proposed designs were evaluated from the functional and economic point of view, thus finding that the best alternative in this case was bypass channel.

managing to find that the best alternative for this case

**Key Words:** Fish step, Endemic fish, Cholguán river.

## 1. INTRODUCCIÓN

Chile es un país considerado privilegiado, ya que, debido a su geografía, gran cantidad de cauces superficiales y pendientes presentes, principalmente en zonas montañosas, posee un gran potencial hídrico. Actualmente, el 36% del potencial instalado corresponde al sector hidráulico (CNE, 2020), cifra que aumentará en un futuro cercano según la política energética 2050 (Laborde et al, 2018).

A pesar de beneficiarse con un gran número de ríos, la riqueza de especies de peces nativos de Chile es relativamente baja y endémica. Por otro lado, gran parte de las especies están en peligro de extinción o presentan algún riesgo de conservación (Habit et al., 2006). Es por esto que es de suma importancia resguardar el hábitat de la fauna dulceacuícola del país, principalmente el de aquellas especies que solo se encuentran naturalmente en los ríos de Chile.

Producto del emplazamiento de obras hidráulicas transversales sobre los ríos, enfocada a la satisfacción de las necesidades, primordialmente energéticas y de riego, se generan relevantes impactos ambientales. Uno de los impactos más importantes que afectan directamente la fauna íctica, corresponde al efecto barrera (Meier, 2011), ocasionado por la barrera transversal, la cual provoca el impedimento de la conectividad longitudinal del río, limitando los distintos movimientos naturales de especies acuáticas.

Una de las medidas de mitigación frente al impacto provocado por una barrera transversal, es la construcción de pasos para peces, con el objetivo de permeabilizar la barrera, y así, permitir el desplazamiento de los peces, tanto aguas arriba, como aguas abajo. Sin embargo, la mayoría de las obras de paso para peces se han desarrollado en los ríos templados del hemisferio norte y van dirigidos a especies de peces deportivos migratorios (Link & Habit, 2015).

Los peces nativos de Chile son de tamaño pequeño (Vila, Fuentes & Contreras, 1999). Por tal razón los criterios de diseño de pasos para peces dirigidos especies salmónidos no son los adecuados para los peces endémicos de Chile.

El presente proyecto busca otorgar opciones de diseño de pasos para peces, que satisfagan las necesidades de las especies de peces endémicas de Chile. Dichos diseños se realizaron

para una central hidroeléctrica de pasada correspondiente al Proyecto Hidroeléctrico Molinos de Agua (en adelante “PHMA”) ubicado en el río Cholguán, tributario del río Itata.

### **1.1. Justificación del tema**

El escenario para los peces nativos de agua dulce en Chile es alarmante, pues existe una sostenida disminución de sus rangos de distribución y de sus tamaños poblacionales en ríos y lagos chilenos (Vila et al. 1999, Habit et al. 2006). Sin ir más lejos, en las principales cuencas de la región de Bío Bío habitan especies de peces endémicos en peligro de extinción.

La implementación de centrales hidroeléctricas de pasada, si bien por exigencia consideran un caudal ecológico, la disminución del caudal natural del río y el emplazamiento de una estructura transversal en la zona de bocatoma, constituyen una segregación del hábitat disponible para los peces que allí habitan.

La ley 19.300 exige a los proyectos clasificados como centrales hidroeléctricas mayores a 3 MW, analizar los impactos ambientales que provoca y entregar medidas de mitigación, reparación y compensación para disminuir el daño a los ecosistemas que puedan producir en cualquiera de sus fases. Frente a la fragmentación del hábitat correspondiente a la fauna íctica, según el artículo 168 de la ley 18.892, como medida de mitigación se exige efectuar un programa de siembra de las especies de peces con el objetivo de mantener el nivel original de sus poblaciones, y como medida alternativa se propone construir obras civiles que permitan el libre tránsito de la fauna íctica (paso para peces).

Puesto que la implementación de obras de paso para peces corresponde a una medida de mitigación voluntaria, es motivo de que esta solución sea poco utilizada en los proyectos en que se vea intervenido el cauce de algún río en Chile, 11% de las barreras transversales registradas en el SEIA poseen estructuras que asistan el paso a los peces (Villena, 2017). Además de que la mayoría de los pases de peces existentes en el país están diseñados según normas extranjeras, las cuales están hechos para servir a principalmente a especies de peces deportivos (Meier, 2011).

En el marco de esto, el presente proyecto de título busca aportar en el desarrollo de futuros pasos para peces, para que el diseño de estos se consideren los aspectos relevantes que den cumplimiento a las necesidades de paso de los peces nativos de Chile.

## **1.2. Objetivo General**

- Diseñar de forma preliminar obras de paso para peces endémicos en una central hidroeléctrica de pasada del río Cholguán.

## **1.3. Objetivos Específicos**

- Caracterizar el tipo de barrera transversal y la fauna íctica presentes en proyecto hidroeléctrico Molinos de Agua.
- Definir los criterios de diseño para estructuras que asistan el paso a la fauna íctica, en base a recomendaciones extranjeras y a la realidad local.
- Dimensionar obras de paso para peces dirigidos a la fauna endémica del río Cholguán.
- Comparar mediante análisis de factibilidad funcional y económica, las obras diseñadas.

## **2. ESTADO DEL ARTE**

El presente proyecto se desenvuelve en propuestas de diseños de estructuras, que cumplan con permitir a la fauna íctica endémica franquear la barrera transversal que el PHMA conlleva. Dicho proyecto, se encuentra ingresado y aprobado en el Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) con tipología “c” (Centrales generadoras de energía mayores a 3 MW). A continuación, se presenta un estudio del arte de las variables involucradas en el proyecto.

### **2.1. Fauna íctica de Chile**

La ictiofauna dulceacuícola nativa chilena, se compone de 11 familias, 17 géneros y alrededor de 44 especies (Habit, Dyer, & Vila, 2006). Asimismo, el nivel de aislamiento que exhiben las cuencas, producto de la presencia del desierto por el norte, la cordillera por el este, y los cambios paleo-climáticos fríos por el sur, condiciona a que las mayorías de las especies de peces del país sean endémicas de Chile (Vila et al., 1999). Además, la riqueza de peces de Chile ostenta una singularidad evolutiva y ecológica de sus especies que le otorgan un alto valor de conservación (Victoriano et al., 2012). A lo largo de Chile, la mayor cantidad de especies de peces de agua dulce se concentra en la zona centro-sur del país, entre 36° y 41° latitud sur (Vila et al., 1999).

La mayoría de los peces nativos de aguas continentales de Chile no exhiben fuertes patrones migratorios, siendo principalmente peces residentes estrictos de agua dulce (Link & Habit, 2015; Wilkes et al, 2017). No obstante, a pesar de no poseer conductas migratorias río-mar (o viceversa) demandan realizar movimientos locales para completar sus ciclos de vida (Piedra et al., 2012) y mantener patrones idiosincráticos de flujo genético dentro del río (Victoriano et al., 2012).

### **2.2. Pasos para peces**

Las vías para peces no eliminan el daño ecológico causado por las obras hidráulicas transversales, pero es una medida que mitiga los impactos generados por el emplazamiento de estas, tal como, la disminución del hábitat fluvial disponible en zonas posteriores a la represa, restricciones al movimiento de los diferentes organismos acuáticos, alteraciones en la calidad de las aguas, entre otros (García-Lancaster, 2006; Habit et al,2006). Por ende, la

implementación de obras de paso logra un aumento en la compatibilidad ecológica de las barreras transversales.

### *2.2.1. Restricciones de diseño*

El funcionamiento eficiente de un pase para peces requiere conocimientos sobre la ecología y biología de los peces (Link & Habit, 2015), los cuales deben ser considerados antes del diseño de un dispositivo de franqueo.

#### a) Aspectos biológicos

Los ciclos de vida de los peces definen sus patrones de desplazamiento dentro de una cuenca. Existen diversos patrones de migración, que pueden ser ascendente, de desove, para intercambios de población, descendente o de deriva catastrófica (DVWK, 2002). La mayoría de los peces nativos de Chile no exhiben fuertes patrones migratorios (Link and Habit, 2015; Wilkes et al, 2017), pero de igual forma requieren de libre tránsito a través del río para desarrollar adecuadamente su ciclo de vida.

Otro aspecto biológico relevante para el diseño de paso para peces es su tamaño, puesto que, de ello dependen directamente su capacidad de natación (O' Connor et al., 2017). La capacidad de nado se refiere a la combinación de velocidades que pueden alcanzar los peces. Existen tres modalidades de natación (Bell, 1990), las cuales se definen como:

- Velocidad sostenida  
Concierne a una velocidad baja que puede ser mantenida durante largos periodos de tiempo sin causar fatiga (más de 200 min.), dado a que este modo de natación solo requiere acción de musculatura roja dependiente de un metabolismo aeróbico.
- Velocidad ráfaga  
Corresponde a altas velocidades de natación alcanzadas por los peces por un corto periodo de tiempo, entre 15 a 20 segundos, asimismo, requiere acción de la musculatura blanca del pez, por lo que es una actividad anaeróbica.
- Velocidad prolongada  
Cubre un espectro entre las velocidades ya mencionadas y requiere acción tanto de musculatura roja (aeróbica) como de musculatura blanca (anaeróbica).

Con el fin de que los peces puedan superar una estructura de paso, la velocidad del agua que circula por esta debe ser inferior a la velocidad crítica de nado de la especie más débil

presente en el lugar (Peake, 2004). Dicha velocidad pertenece a un caso particular de la modalidad prolongada y entrega una estimación aproximada de la velocidad de natación aeróbica máxima en los peces (Özbilgin et al., 2011).

Es común en el diseño de canales el uso de curvas de resistencia para la recopilación de información específica respecto al tiempo que un pez en particular puede nadar contra velocidades de agua determinadas antes de llegar a la fatiga (Katopodis, 1992).

#### b) Aspectos Ecológicos

Es esencial poseer conocimientos acerca de la preferencia de hábitat de las especies presentes, en vista de que, este aspecto controla las características en cuanto a sustrato y profundidad del paso (Link and Habit, 2015). La parte inferior de un pase debe estar cubierto a lo largo de toda su longitud con una capa de al menos 0,2 m de espesor de un sustrato grueso típico del río (DVWK, 2002), con el fin de facilitar el paso a especies pequeñas.

Otro aspecto ecológico considerable recae en el comportamiento que adquieren los peces de acuerdo a la posición en la columna de agua, el cual puede ser bentónico (de fondo), aguas medias o pelágicas (de superficie). Los peces nativos de Chile se caracterizan por ser principalmente bentónicos (Link and Habit, 2015).

#### 2.2.2. Requisitos generales de diseño

En DVWK (2002) se propone requisitos para el buen diseño y funcionamiento de pasos para peces. Dichas recomendaciones dependen de la especie objetivo y del flujo de agua disponible. A continuación, se presentan los principales aspectos:

##### a) Posición óptima

La dirección natural del flujo del cauce es la posición óptima para el paso de peces. Además, este debe ubicarse preferentemente en una o ambas orillas del río intervenido, no solo porque los migradores tienen una tendencia general a desplazarse por las orillas sino también para facilitar el acceso para su control, vigilancia y mantenimiento (Larinier, 2002).

##### b) Entrada y flujo de atracción

La entrada es el componente de la estructura ubicada más aguas abajo en un paso para peces. Corresponde a la parte individual más importante en los dispositivos de franqueo (Clay,

1995). Si la entrada no logra atraer a los peces del río, el paso para peces no funcionará de forma eficiente. La ubicación ideal de la entrada es próxima a una orilla y lo más aguas arriba que permita la barrera transversal, junto a la base del obstáculo en los lugares en que se concentra mayor caudal (Clay 1995; DVWK, 2002; O'Connor et al., 2017). Mientras más aguas abajo se encuentra la entrada, mayor debe ser el flujo de atracción del paso.

El ángulo de la entrada con respecto a la dirección del cauce no debe superar los 45°; esto ayuda a reducir los tiempos de búsqueda y evita que los peces se dirijan hacia la mitad de la barrera transversal (DVWK, 2002), sin embargo, según la experiencia en obras de paso dirigidos a especies de peces pequeños en Australia, se propone que la ubicación de la entrada debe ser en ángulos menores a 90° respecto a la línea central de la corriente (O'Connor et al., 2017), lo que garantiza que no haya recirculación ni remolinos.

En sus movimientos de ascenso los peces tienden a seguir la corriente principal del río (DVWK, 2002). Por ello, el caudal de llamada debe ser tal, que permita captar la atención de los peces. Si no existe atracción, un paso para peces puede no ser funcional. De esta manera, cuanto mayor sea el caudal de llamada, más probable será que los peces localicen el dispositivo de paso (Larinier, 2002). Diferentes autores recomiendan un caudal de atracción comprendido entre el 5 y 10 % del total del que circula por el cauce durante la época de migración (Larinier, 1992; Williams et al., 2012), sin embargo, para grandes ríos entre 1 y 5 % del caudal circulante por la presa sería adecuado (Larinier, 2002)

Para facilitar la entrada al paso para peces a las especies bentónicas, se recomienda vincular dicho paso al fondo del río con una rampa, donde la pendiente no debe superar una relación de pendiente de 2H: 1V (DVWK, 2002).

### c) Salida

La salida de un paso para peces debe asegurar que los peces no sean barridos aguas abajo. Los vectores de flujo no deben variar más de 90° respecto a la línea de corriente (O'Connor et al., 2017). Cuando el paso para peces está instalado en una central de generación de energía eléctrica, por seguridad de los peces la salida del paso debe ubicarse lo suficientemente lejos de la captación del agua a turbinar. Si la velocidad del flujo en la cabecera de la presa es superior a 0,5 m/s la salida debe prolongarse hasta encontrar dicha condición. Esto contribuye



a que posterior a la utilización del paso, los peces puedan continuar su desplazamiento sin problemas. Las fluctuaciones de altura del flujo en la salida del paso, deben ser evitadas al máximo. Para fluctuaciones entre 0,5 a 1 m, es recomendable el uso de pasos tipo “Ranura vertical”, pues debido a su diseño permite funcionar sin problemas en el rango de fluctuaciones mencionados. Para fluctuaciones superiores a 1 m, es recomendable otorgar diferentes alturas de salida para cada medida de fluctuación. Otras opciones menos recomendadas corresponden al uso de compuertas, cámaras de unión de flujos y ascensores.

Para minimizar la entrada de desechos flotantes y la acumulación de escombros dentro del paso para peces la salida de este debe tener instalada una rejilla protectora (O’Connor et al., 2017).

#### d) Longitudes, pendiente y piscinas de descanso

La pendiente en un paso para peces, determina la velocidad del agua dentro de este, además de parámetros de ancho útil, longitud y profundidad del paso, los cuales determinan el comportamiento hidráulico del flujo al interior de la obra. Estas variables dependen del tipo de paso que se desea construir, así como de la descarga disponible. Todos estos parámetros están condicionados por las características y capacidades natatorias de la o las especies objetivo a las cuales se buscan otorgar asistencia en el paso.

Zonas de descanso o piscinas de descanso deben estar presentes en los pasos de peces. En ellas los peces pueden interrumpir su ascenso y recuperarse del esfuerzo. Para migradores pequeños de Australia el desnivel máximo es 1 m (O’Connor et al, 2017). Para peces nativos de Chile la distancia entre áreas de descanso debe ser menor al producto entre la velocidad relativa a la que se desplaza el pez (velocidad de nado menos velocidad del agua) y el tiempo en que puede ser mantenida dicha velocidad (Link & Habit, 2015).

#### e) Mantenimiento

La necesidad de un mantenimiento regular debe ser considerado desde el inicio de la planificación de un paso para peces, ya que la falta de mantención es la causa principal de insuficiencia funcional.

Los pasos del tipo natural son más fáciles de mantener y requieren una mantención con menos frecuencia que un paso de tipo técnico (DVWK, 2002).

g) Medida para proteger pasos

El cuidado principal es evitar cualquier actividad de pesca o deporte que pudiese intervenir en el comportamiento de los peces, pues estos son muy sensibles a ruidos e iluminación, entre otras cosas.

g) Integración con paisaje

Se debe hacer todo lo posible para integrar el paso de peces en el paisaje de la manera más armoniosa posible, aunque el funcionamiento correcto de la vía de peces debe tener prioridad sobre el paisajismo. Bajo este aspecto, los tipos de construcción similares a la naturaleza vinculan las consideraciones funcionales y de paisajismo de mejor manera. Los materiales de construcción naturales o materiales de construcción que son típicos de las condiciones locales deben usarse en la construcción de canales de paso de manera consecuente. Se debe permitir que la vegetación prolifere de forma natural tanto como sea posible para crear una posible cubierta y sombrear el canal de paso, aunque podría ser necesario plantar inicialmente plantas y arbustos locales adecuadamente adaptados.

### 2.2.3. Tipología de pasos

Los pasos de peces poseen diversas clasificaciones. Se separan en pasos naturales y pasos técnicos (DVWK, 2002). A continuación, se presentan los pasos para peces mayormente empleados en el mundo y en Chile (Villena, 2017) son:

- a) Pasos naturales: incluye los ríos artificial y rampas para peces.
- b) Pasos técnicos: donde se encuentran las escalas tipo Denil, esclusas y ascensores y finalmente, pases de piscinas, en el cual los más destacados son las escalas artesas y los de ranura vertical.

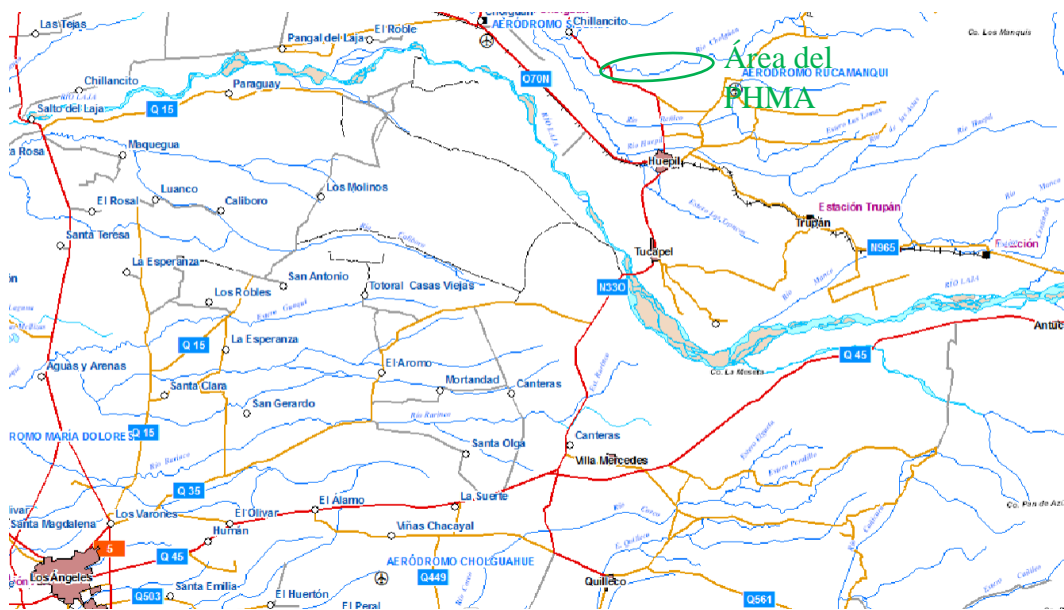
### 3. METODOLOGÍA

En el presente capítulo se muestran las estrategias implementadas para el desarrollo de este proyecto de título, considerando cada uno de los objetivos planteados.

#### 3.1. Caracterización de caso en estudio

Mediante revisión de los documentos correspondientes al estudio de impacto ambiental y adendas del PHMA disponibles en el Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEA, 2020), se caracterizó el caso en estudio.

El PHMA se localiza sobre el río Cholguán (afluente del río Itata), dicho río es el límite entre las comunas de Yungay (región de Ñuble) y Tucapel (región del Bío-Bío), ubicándose la obra de toma en las coordenadas UTM 246.999E 5.883.780N.



**Figura 1. Localización de Proyecto Hidroeléctrico Molinos de Agua (PHMA).**

(Fuente: IGM, 2020)

##### 3.1.1. Características de barrera transversal

La obra correspondiente a la barrera transversal y sus características definen los tipos de paso para peces que son factibles de realizar en el sitio. En el PHMA la obra de captación la conforma una barrera transversal tipo móvil y un canal de derivación que se ubica en la ladera

oeste del río Cholguán (Anexo A), por este motivo, el paso para peces debe ser construido en la ladera este. Las características de la barrera se presentan en la tabla 1.

**Tabla 1. Características de la barrera transversal en PHMA.**

Tipo de barrera	Móvil
Altura	8,5 m
Ancho	33 m
N° de compuertas	4
Altura de compuertas	7,5 m
Ancho de Compuertas	7,3 m

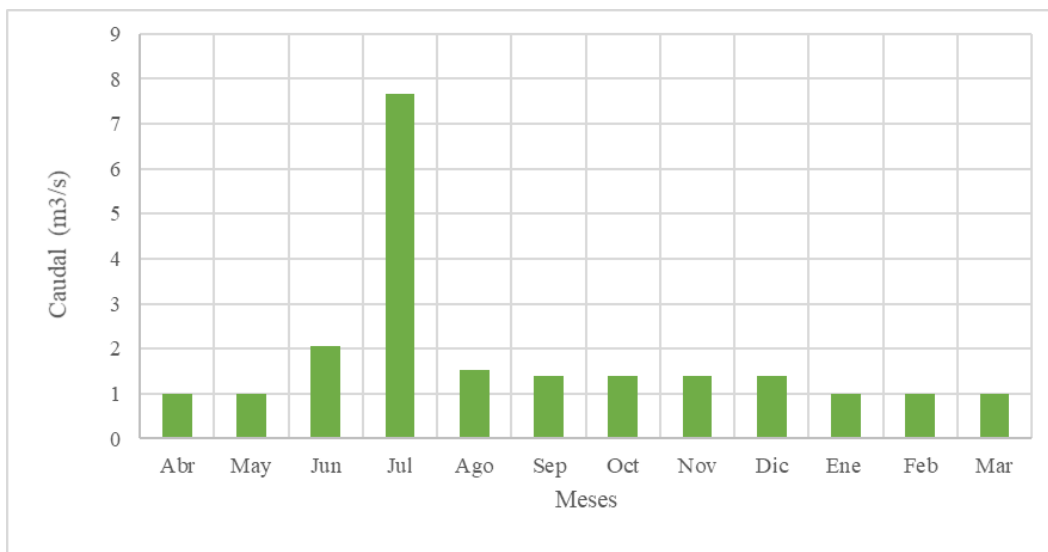
(Fuente: Elaboración propia, 2020)

### 3.1.2. Caudal disponible y niveles de agua

La poza generada en la zona de captación operará normalmente a la cota de 350,35 m.s.n.m. Dicho nivel se mantendrá constante todo el año, a excepción de eventos extremos de crecidas donde las compuertas se abrirán y producto de esto, el nivel del agua disminuirá. Sin embargo, no existe información respecto al caudal disponible y los niveles del río aguas abajo de la barrera. Por tal razón, estos fueron estimados a partir del caudal pasante por la barrera y las características topo-batimétricas del sitio, cuyo caudal pasante o disponible alude al caudal ecológico más los excedentes de caudales no utilizados para la generación de electricidad.

El PHMA ha sido diseñado para un caudal de 32 m<sup>3</sup>/s; y de acuerdo al estudio de evaluación ambiental se han establecido dos caudales ecológicos, 1,4 m<sup>3</sup>/s para la temporada invernal (de junio a octubre) y 1 m<sup>3</sup>/s para la temporada estival (de noviembre a mayo). Los caudales pasantes aguas abajo de la obra de toma para un año promedio se muestran en la figura 2, la obra de paso para peces debe estar diseñada de tal forma que permita el paso al total o parte de estos caudales.

De acuerdo a la figura 2, para un año promedio se espera que el caudal máximo pasante sea 7,67 m<sup>3</sup>/s y el mínimo sea el caudal ecológico en la temporada estival (1 m<sup>3</sup>/s).



**Figura 2. Caudal pasante río Cholguán.**

(Fuente: Elaboración propia, 2020)

Los niveles de agua fueron estimados mediante la simulación hidráulica del río, a partir de la información correspondiente a los perfiles topo-batimétricos del sector bocatoma y los caudales medios mensuales pasantes máximo y mínimo. Dicha simulación se realizó con el programa HEC-RAS (2019), donde la rugosidad utilizada corresponde a la informada por el PHMA para el sector bocatoma.

La diferencia entre los niveles de agua entre la poza y aguas abajo de la barrera fueron estimados en el anexo A y se muestran en la tabla 2, siendo de mayor interés, el desnivel máximo, ya que define las dimensiones de la obra de paso.

Según lo observado en la tabla 2, el máximo desnivel a superar por los peces corresponde a 6,69 m.

**Tabla 2. Niveles de agua en barrera transversal.**

Zona	Cota (m.s.n.m)	Desnivel (m)
Poza	350,35	-
Cola Qmax= 7,67 m³/s	343,93	6,42
Cola Qmin= 1 m³/s	343,66	6,69

(Fuente: Elaboración propia, 2020)

### 3.1.3. Topografía del sitio

La topografía disponible en los antecedentes del proyecto no se considera adecuada para un diseño preliminar de obras de paso para peces, debido al poco detalle que se muestra respecto al sitio de interés (Esc. 1:5000). Por tal razón, con la información correspondiente a los perfiles topo-batimétricos implementados para la modelación hidráulica del río en el sector bocatoma, se dibujó una topografía detallada del sitio, donde se utilizó el programa Civil 3D (2019). Antecedentes de la topografía se pueden observar con detallan en el anexo F.

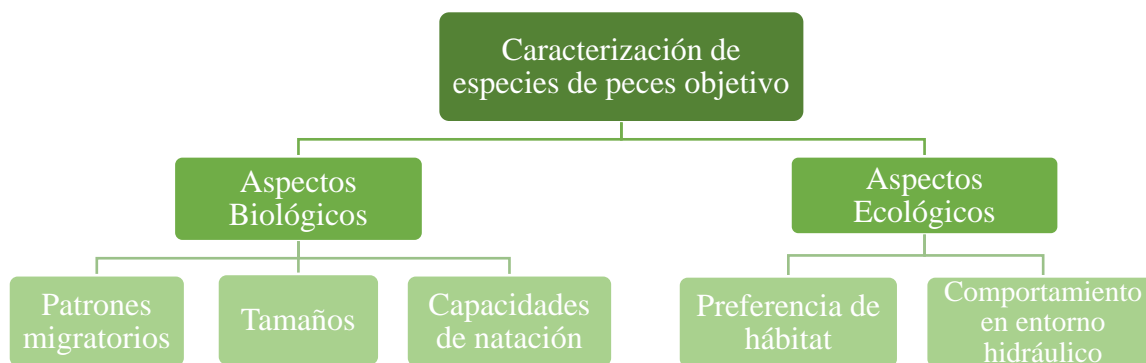
### 3.2. Definición y caracterización de fauna íctica

Para el diseño de una obra de paso para peces es necesaria la información correspondiente a las especies de peces que se encuentran presentes en el lugar, siendo de interés las nativas, principalmente aquellas que sean endémicas de Chile.

Mediante la revisión de la línea de base del PHMA disponible en el estudio de impacto ambiental, se identificaron las especies presentes en el río Cholguán, distinguiendo el origen y los estados de conservación.

De la fauna íctica presente en el río Cholguán se definieron especies de peces objetivo, las cuales corresponden a las especies a las que va dirigido el diseño del paso para peces. En general, para el caso chileno se definieron como especies objetivo aquellos grupos de peces endémicos que presentan un estado de conservación más desfavorable (peligro de extinción).

Las especies objetivo fueron caracterizadas de acuerdo a la figura 3.



**Figura 3. Caracterización de especies de peces objetivo.**

(Fuente: Elaboración propia, 2020)

Ya que para los peces objetivo de este proyecto no existen antecedentes correspondientes a sus capacidades de natación, ésta fue estimada a partir de los tamaños de la fauna íctica registrados en el PHMA y estudios en laboratorio (Laborde et al., 2016). Se adoptó la velocidad crítica estandarizada en longitud de cuerpo de la especie estudiada *C. galusdae*, y se multiplicó por la longitud media de cuerpo de las especies objetivo. Junto con la estimación de velocidades críticas de nado, se construyeron curvas de resistencia para cada especie objetivo, utilizando la relación entre velocidades críticas estimadas y la velocidad crítica del *C. galusdae*.

Además de identificar las especies objetivo, es necesario conocer las preferencias de hábitat respecto a velocidad, profundidad y tipo sustrato de fondo para los peces nativos de Chile, debido a que son especies no migradoras, es importante mantener una continuidad de hábitat dentro de la estructura de franqueo. Las preferencias de hábitat se expresan en forma de "curvas de preferencia", las que son funciones matemáticas que muestran el grado de adaptación de una especie determinada en un estado del ciclo de vida, cuyo índice de preferencia varía entre 0 (valoración mínima, no aceptables) y 1 (máxima preferencia) (CEA, 2008). A partir de, estudios científicos como EULA (2000) y antecedentes correspondientes al PHMA se determinaron las curvas de preferencia de hábitat (CPH), respecto a, profundidad, velocidad y tipo de sustrato para las especies establecidas como objetivo.

### **3.3. Definición de criterios de diseño y dimensionamiento de paso para peces**

Una vez caracterizado el sitio de estudio y la fauna íctica a la que se le requiere asistir el paso, se seleccionaron las alternativas de paso para peces, una del tipo natural y otra del tipo técnico, mejor ajustadas a las especies endémicas presentes en el río y características de la central.

En base a manuales extranjeros, al comportamiento y capacidades de las especies de peces objetivo, se instauraron los criterios generales para el correcto funcionamiento de un paso para peces dirigido a la fauna endémica nacional, los cuales son independientes del tipo de paso. Adicionalmente, se establecieron criterios de diseño propios para cada tipo de pase para peces.

3.3.1. Paso natural

Al dimensionar el paso tipo natural se debe verificar el funcionamiento hidráulico, para lo cual DVWK (2002) recomienda el uso de la ecuación de Darcy-Weisbach para canales abiertos (Ec. 3.1, tabla 3a), donde el cálculo del factor de resistencia es adaptado para considerar tanto la resistencia que ejerce el fondo del canal, como la otorgada por las perturbaciones (Rouvé, 1987) (Ec. 3.2, tabla 3a). A causa de que existen ciertas incertezas respecto a los resultados obtenidos por la ecuación de resistencia mencionada anteriormente y no se considera adecuada para flujos macro rugosos (Baki et al., 2014; Cassan et al., 2015). Se utilizó, conjuntamente, para el cálculo del comportamiento del flujo, las ecuaciones obtenidas a través de pruebas de laboratorio por Baki et al. (2016) (tabla 3a y 3b). Para los cálculos, primeramente, se definieron las variables de profundidad, sección transversal (ancho del fondo y talud), tamaño del sustrato en el fondo (verificando que este no actúe como obstrucciones), tamaño de los cantos de rodados y su distribución (separación entre cantos rodados en dirección y transversal al flujo). Finalmente, de forma iterativa se calcula la pendiente longitudinal, de tal forma que la velocidad máxima del flujo a la que se enfrentan los peces sea inferior a la velocidad crítica de nado de la especie objetivo más débil.

**Tabla 3a. Fórmulas para cálculo del flujo, Darcy-Weisbach con coeficiente de resistencia determinado según Rouvé (1987).**

$V_m = \frac{1}{\sqrt{f_t}} \sqrt{8 g R_h s} \quad (3.1)$	$\frac{1}{\sqrt{f_0}} = -2 \log \left( \frac{\frac{k_s}{R_h}}{14.84} \right) \quad (3.3)$
$R_h = \frac{A_m}{P_m} \quad (3.1a)$	$f_s = 4 C_w \frac{\sum A_s}{A_{ot}} \quad (3.4)$
$f_t = \frac{f_s + f_0 \left( 1 - \frac{\sum A_{os}}{A_{ot}} \right)}{1 - \frac{\sum V_s}{V_t}} \quad (3.2)$	$V_{max} = \frac{V_m}{1 - \frac{\sum A_{ts}}{A_m}} \quad (3.5)$
$Q = V_m A_m \quad (3.6)$	



Dónde:  $V_m$  es velocidad media en m/s;  $f_t$  coeficiente de resistencia total;  $R_h$  radio hidráulico;  $g$  aceleración debida a la gravedad en m/s<sup>2</sup>;  $s$  pendiente longitudinal;  $f_s$  coef. de resistencia de fondo;  $f_0$  coef. de resistencia por perturbaciones;  $k_s$  tamaño d90 sustrato del fondo en m, ecuaciones válidas para  $k_s < 0.45 R_h$ ;  $\frac{\sum A_{os}}{A_{ot}}$  relación entre áreas de perturbaciones y área total en planta;  $\frac{\sum V_s}{V_t}$  relación entre volumen inmerso de canto rodados y volumen total del canal;  $C_w$  coeficiente de arrastre;  $\frac{\sum A_{ts}}{A_m}$  relación entre área mojada de cantos rodados y área mojada del flujo sin perturbaciones;  $V_{max}$  velocidad máxima del flujo;  $Q$  descarga en m<sup>3</sup>/s.

(Fuente. Elaboración propia, 2020)

**Tabla 3b. Fórmulas para cálculo del flujo, Baki et al., 2016**

$Q = Q^* \sqrt{g s R_v^3 B^2}$ (3.7)	$V_m = V_m^* \sqrt{g S_0 R_v}$ (3.10)
$\frac{H}{D} = m_1 Q^{*k_1}$ (3.8)	$V_m^* = m_2 Q^{*k_2}$ (3.10a)
$R_v = H \left(1 - \frac{2}{3H} \lambda D\right)$ (3.9)	$V_{max} = V_{max}^* \sqrt{g S_0 R_v}$ (3.11)
$\lambda = \pi \frac{D^2 N}{4 A}$ (3.9a)	$V_{max}^* = m_3 Q^{*k_3}$ (3.11a)

Dónde:  $Q^*$  descarga adimensional;  $R_v$  radio hidráulico volumétrico;  $B$  ancho del fondo;  $H$  profundidad media del flujo;  $\frac{H}{D}$  altura relativa de cantos rodados;  $\lambda$  densidad de cantos rodados en el fondo;  $N$  número de cantos rodados en un volumen de control;  $A$  área de fondo en un volumen de control;  $D$  diámetro de cantos rodados;  $V_m^*$  velocidad media adimensional;  $V_{max}^*$  velocidad máxima adimensional;  $m_1$ ,  $m_2$  y  $m_3$  coeficientes empíricos con valores de 0.5, 0.93 y 1.81 respectivamente,  $k_1$ ,  $k_2$  y  $k_3$  exponente empírico con valores de 0.64, 1 y 0.82 respectivamente.

(Fuente. Elaboración propia, 2020)

Determinadas las velocidades de agua a las que se enfrentan los peces, se procedió a definir el intervalo entre áreas de descanso verificando que dicha longitud sea menor al producto de la velocidad relativa a la que se desplazaran la especie más débil (diferencia entre velocidad crítica de nado y velocidad del flujo) con el tiempo respectivo que resisten dichos peces nadando.

Las dimensiones de las áreas de descanso se definieron de acuerdo al tamaño recomendado para piscinas de descanso en rampas de rocas por O'Connor et al., (2017), mientras que la profundidad y sustrato del fondo se seleccionaron de modo que presenten preferencia por parte del conjunto de peces objetivo. Con el fin de evitar que se produzcan cambios de régimen en la transición rápidos-pozas, se realizó una simulación del flujo de un tramo representativo del río artificial. Para esto se utilizó el programa HEC-RAS donde el coeficiente de Manning utilizado en la zona de rápidos, corresponde al equivalente que genera las condiciones de velocidad media y profundidad media del flujo ya obtenidos y en la zona de la poza se utiliza el coeficiente recomendado por Te Chow (1968) para corrientes naturales sobre piedras con presencia de montículos de arena y algunos matorrales.

A razón de que el sustrato del fondo del río artificial fue diseñado como una escollera, se verificó la estabilidad y el flujo entre las rocas de acuerdo USBR (2007). En cuanto, a la salida del paso para peces o entrada de agua se dimensionó mediante balance de energía entre la poza y el inicio del río artificial.

Finalmente se procedió a elaborar planos de diseño a partir de las dimensiones de la barrera transversal y la información topográfica correspondiente al PHMA. En dicho plano el trazado busca reducir los movimientos de tierra e intervenir lo menos posible la flora del sector, con el fin de que la estructura de paso sea ambientalmente amigable y a la vez factible económicamente.

### *3.3.2. Paso técnico*

Para el diseño preliminar de una obra de paso para peces de tipo técnico se adaptaron los criterios recomendados para migradores pequeños de Australia. Sin embargo, para lograr velocidades de flujo asequibles para las especies objetivo del proyecto se estableció una velocidad máxima y las demás variables se calcularon a partir de esta, verificando que las variaciones respecto a los diseños recomendados por manuales extranjeros sean mínimas,

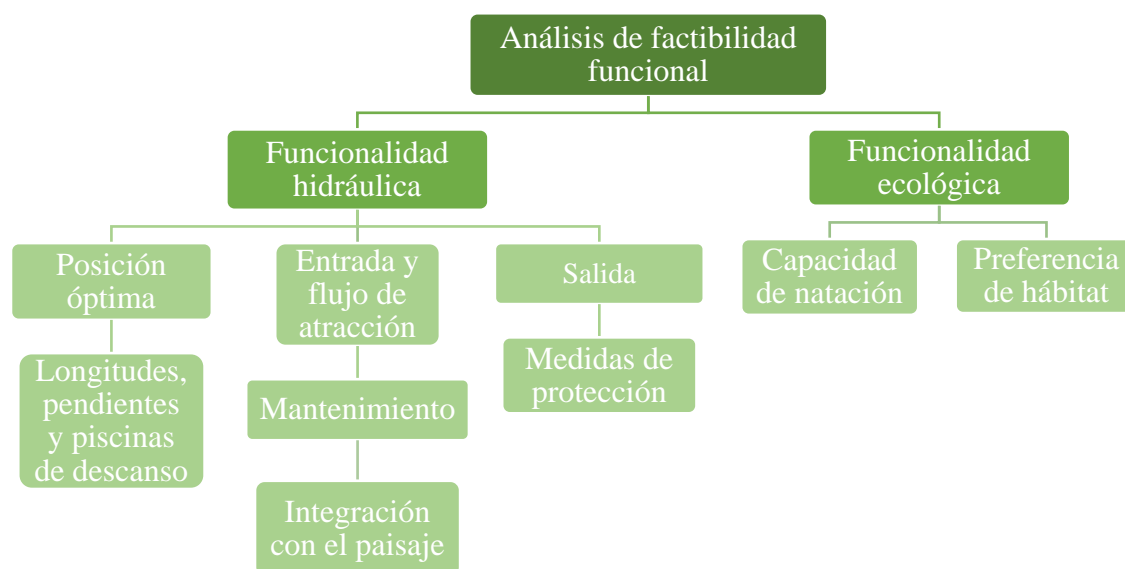
con el objeto de evitar comportamientos de flujo no deseados. Además, se incluyeron criterios desde el punto de vista ecológico, como lo es la preferencia de hábitat de las especies objetivo.

Al igual que para el paso de tipo natural, se elaboraron planos de diseño de este tipo de pase, a partir de las dimensiones de la barrera transversal y la información topográfica correspondiente al PHMA.

### 3.4 Análisis de factibilidad funcional y económica

#### 3.4.1. Factibilidad funcional

Para el análisis de factibilidad funcional de los pasos para peces diseñados, se realizó una evaluación de dos grupos de criterios, uno correspondiente a la funcionalidad hidráulica y el otro a la funcionalidad ecológica, tal como se muestra en la figura 4.



**Figura 4. Análisis de factibilidad funcional.**

(Fuente: Elaboración propia, 2020)

La funcionalidad hidráulica se asocia a los requisitos generales para el correcto funcionamiento de un paso para peces. Mientras que la funcionalidad ecológica se relaciona al cumplimiento de los requerimientos de las especies objetivo.

Se evaluaron los diseños de paso para peces, asignando un valor entre 0 y 1 a cada criterio, con el fin de establecer una ponderación de su respectivo cumplimiento. Seguido de esto, se

obtuvo el porcentaje de cumplimiento asociado a cada grupo de criterios, calculando el promedio de cada uno. Finalmente se consiguió la ponderación final del proyecto, multiplicando la ponderación de ambos conjuntos de criterio.

#### *3.4.2. Factibilidad económica*

Para analizar si es factible económicamente la implementación de una obra de paso para el PHMA, para cada diseño preliminar de paso para peces se realizó el presupuesto estimativo que conllevaría el desarrollo de las obras. Dichos presupuestos, fueron comparados con el costo total del Proyecto Hidroeléctrico Molinos de Agua, con el objetivo de determinar la incidencia que tendría la realización de un paso para peces sobre el costo total de una central hidroeléctrica de pasada.

## **4. RESULTADOS Y ANÁLISIS**

A continuación, se presentan los resultados y análisis concorde a cada uno de los objetivos específicos.

### **4.1. Fauna íctica**

El tramo de río comprendido entre las obras de captación y restitución del PHMA tiene una diversidad biológica de flora y fauna acuática propia de un ritrón en fase de transición a potamón.

Concorde a la línea de base del PHMA, se registraron un total de diez especies de peces, ocho de estas especies son nativas, de las cuales seis, además, son endémicas, es decir, son propias y exclusivas de Chile. Por otra parte, el total de las especies endémicas presentan algún riesgo de conservación. En la tabla 4 se presentan las especies presentes en el PHMA con su respectivo estado de conservación en el que se encuentran actualmente cada una de las especies registradas, junto con esto se recalca el origen de ellas.

Las especies *Salmo trutta* y *Oncorhynchus mykiss* corresponden a especies introducidas, por lo cual, no serán consideradas en este proyecto.

**Tabla 4. Especies de fauna íctica presentes en área de estudio.**

Nombre común	Nombre científico	Origen	Estado de Conservación
Tollo	<i>Diplomystes nahuelbutaensis</i>	Endémico	En Peligro*
Bagrecito	<i>Bullockia maldonadoi</i>	Endémico	En Peligro*
Carmelita	<i>Percilia gillissi</i>	Endémico	En Peligro**
Perca Negra	<i>Percichthys melanops</i>	Endémico	Vulnerable*
Bagre Chico	<i>Trichomyscterus areolatus</i>	Endémico	Vulnerable*
Pejerrey chileno	<i>Basilichthys australis</i>	Endémico	Casi Amenazada***
Perca Trucha	<i>Percichthys trucha</i>	Nativo	Preocupación menor***
Puye	<i>Galaxias maculatus</i>	Nativo	Preocupación menor***
Trucha café	<i>Salmo trutta</i>	Introducido	No aplica
Trucha arco iris	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Introducido	No aplica

(Fuente: Elaboración propia, 2020. Estados de conservación según \*D.S 51/2008 MINSEGPRES, \*\*D.S. 33/2011 MMA y \*\*\* D.S. 19/2012 MMA )

#### 4.1.1. Especies objetivo

Tal como se observa en la tabla 4, en el río Cholguán habitan tres especies endémicas en peligro de extinción, debido al alto valor ecológico que poseen, el diseño de una obra que asista el paso debe ir dirigido a estos peces. Por tal razón, las especies *D. nahuelbutaensis*, *B. maldonadoi* y *P. guillisi* se definen como especies objetivo del proyecto.

Es esencial conocer aspectos respecto a la biología y ecología de los peces objetivo, por lo que se realizó una descripción de cada uno de estas (Anexo B), la tabla 5 visualiza un resumen de los antecedentes más relevantes de cada especie objetivo.

**Tabla 5. Características de especies objetivo**

Especie	Patron migratorio	Forma de nado	Hábitat	Comportamiento
D. nahuelbutaensis	Residente	Subcarangiforme	Zonas rítrales con sustrato grueso y alta turbulencia. Juveniles prefieren zonas poco profundas con velocidades superficiales menores a 0.5 m/s. Adultos prefieren zonas más profundas con velocidades superficiales menores a 1.64 m/s.	Bentónico y Nocturno.
B. maldonadoi	Residente	Anguiliforme	Zonas ribereñas con sustrato arenoso a sustrato con garvas y piedras pequeñas con velocidades superficiales < 92 cm/s	Bentónico y Nocturno.
P. gillissi	Residente	Subcarangiforme	Zonas con sustrato grueso y velocidades superficiales inferiores a 1 m/s .	Bento-pelágico, adultos nocturnos, juveniles nocturnos y diurnos .

(Fuente: Elaboración propia, 2020)

Una característica en común de los peces de interés, es que poseen un comportamiento bentónico, tal como, ocurre con la mayoría de las especies de peces dulceacuícolas nativas de Chile (Link & Habit, 2015). Que los peces chilenos habiten principalmente en el fondo resulta ser una ventaja a la hora de diseñar obras de paso para peces, puesto que la velocidad de flujo a la que se enfrentan los peces corresponde a la que ocurre en el fondo. Es por esto que un fondo altamente rugoso puede generar condiciones adecuadas para el ascenso de los peces con pendientes longitudinales relativamente altas.

#### 4.1.2. Tamaños de peces nativos

Con el fin de estimar las capacidades de natación de las especies objetivo y establecer las dimensiones adecuadas de un paso para peces, se determinó la distribución de tamaños de los peces nativos presentes en el sitio de estudio. Dichos tamaños, se presentan en la tabla 6.

**Tabla 6. Tamaños de especies nativas presentes en área de estudio.**

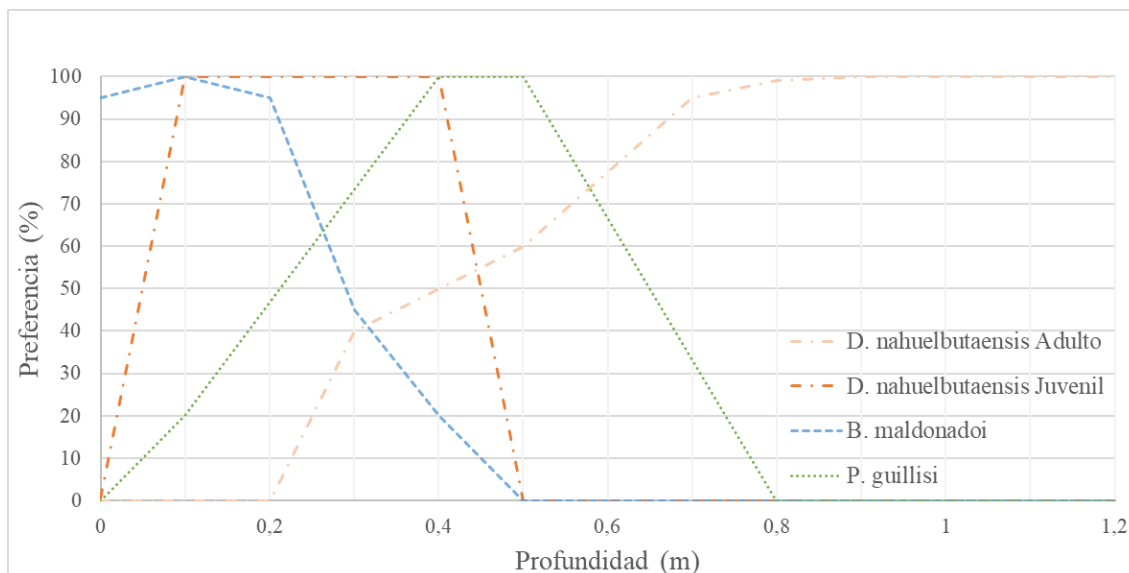
	Especie	Longitudes (mm)			Longitud máxima según literatura (mm)
		Mínima	Media	Máxima	
Objetivo Endémicas Nativas	B. maldonadoi	25	39,3	76	140
	D. nahuelbutaensis	35	47,9	59	260
	P. gillisi	35	53,9	93	80
	P. melanops	34	63,7	112	240
	T. areolatus	31	53,3	119	150
	P. trucha	22	38,7	105	450
	B. australis	32	70,3	161	300
	G. maculatus	43	53,6	83	160

(Fuente: Elaboración propia, 2020)

Tal como se visualiza en la tabla 6, las especies nativas presentes en el río Cholguán se encuentran en un rango de tamaños entre los 22 y los 161 mm. Por lo tanto, se ratifica que las especies nativas de Chile son de tamaño pequeño. De acuerdo a Link & Habit (2015), la especie endémica que puede alcanzar mayor tamaño corresponde a *P. trucha* con una longitud máxima de 450 mm. Dicha longitud debe ser considerada en el diseño de paso para peces, con la finalidad de no impedir el paso a los grandes ejemplares de esta especie. En vista de que el total de peces *D. nahuelbutaensis* registrados según su tamaño, son juveniles (<110 mm), el diseño de paso para peces debe enfocarse en esta etapa de vida.

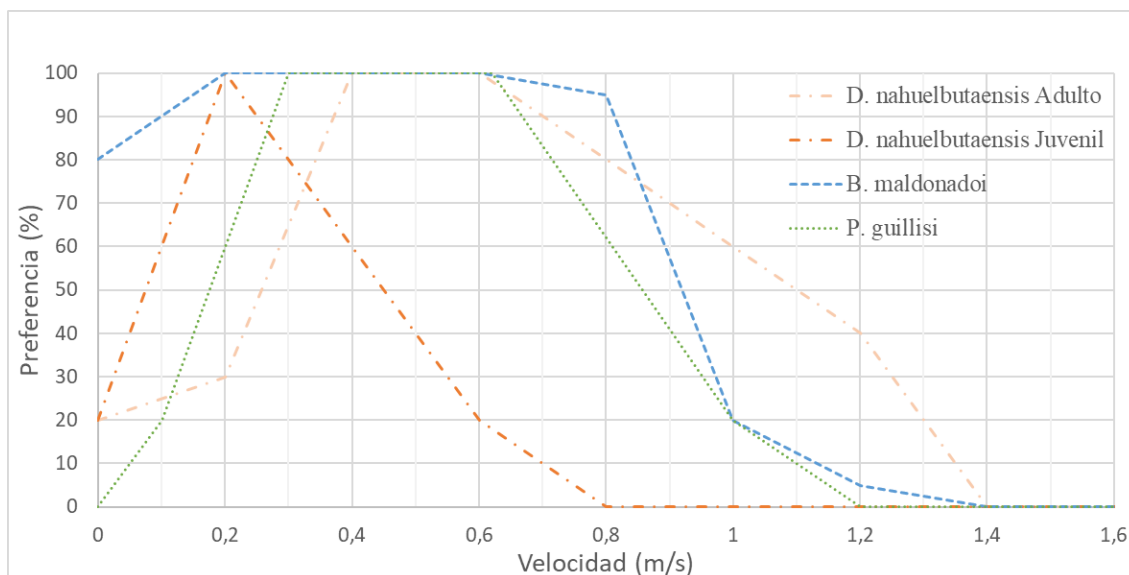
#### 4.1.3. Preferencia de hábitat

A continuación, se presentan las curvas de preferencia de hábitat (CPH) propias de las especies objetivo del proyecto de título, estas fueron construidas principalmente por medio de los antecedentes de EULA (2000) y los aportados por el estudio de especies íctica del PHMA.



**Figura 5.a CPH profundidad especies objetivo.**

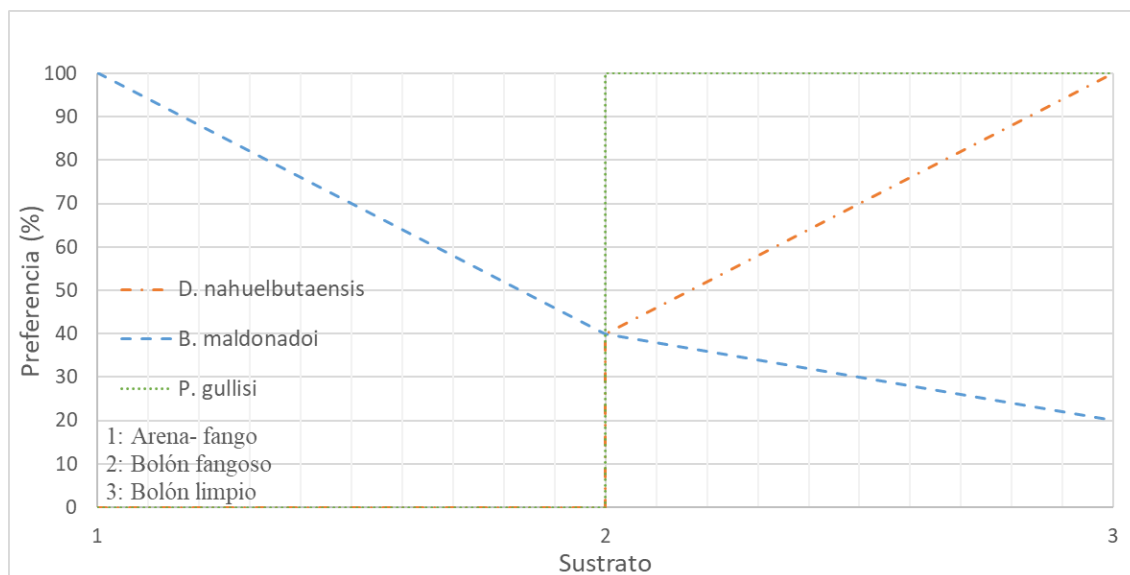
(Fuente: Elaboración propia, 2020)



**Figura 5.b CPH velocidad de flujo especies objetivo.**

(Fuente: Elaboración propia, 2020)





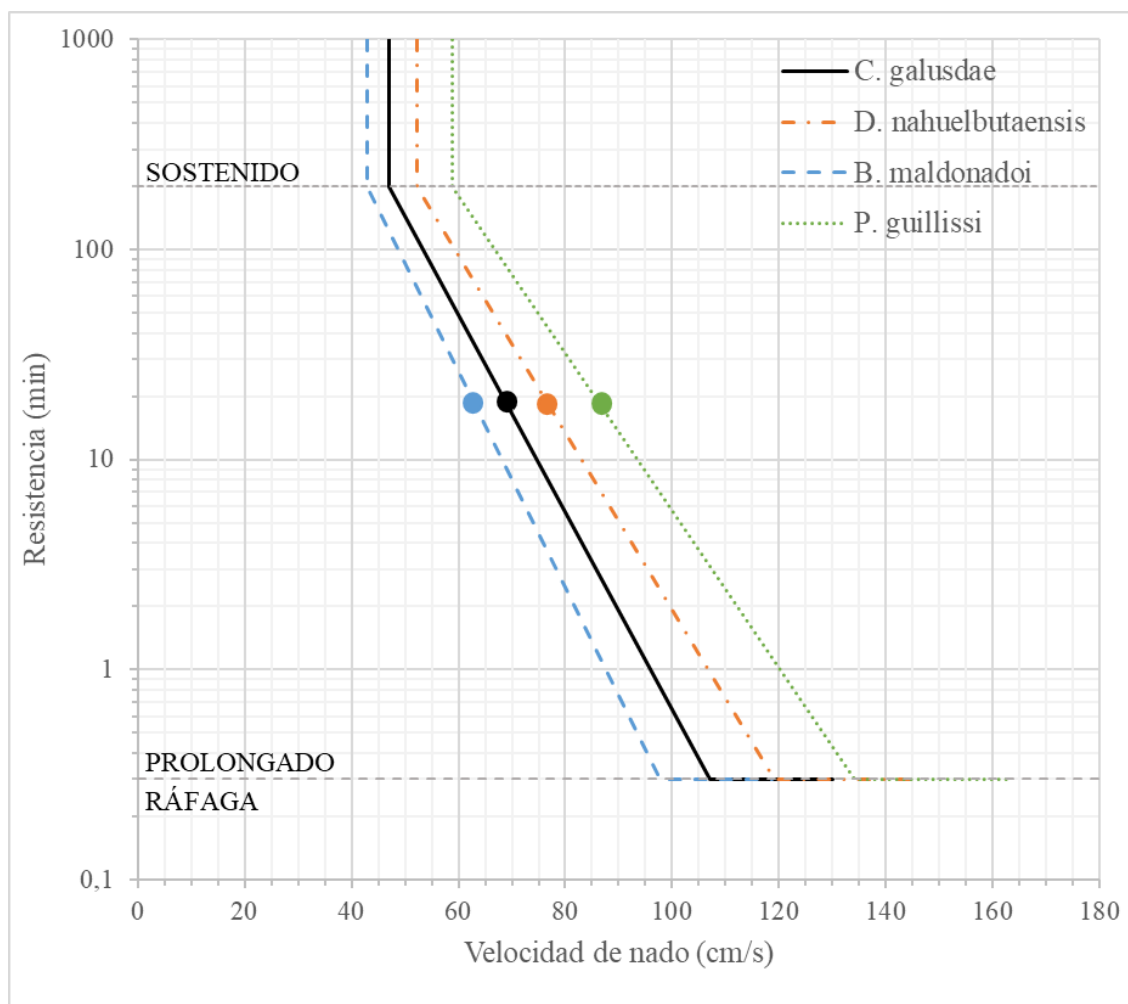
**Figura 5.c CPH sustrato especies objetivo.**

(Fuente: Elaboración propia, 2020)

De las preferencias de hábitat correspondiente a las especies objetivos se puede observar que existe una separación entre las preferencias de cada especie. *D. nahuelbutaensis* en su etapa adulta, requiere de mayor profundidad y velocidad de flujo que las otras dos especies, mientras que *B. maldonadoi* presenta preferencia por sustratos más finos en el fondo. Es por esta razón, que un diseño de paso para peces debe presentar variedad de condiciones para satisfacer al conjunto de especies a las que se les desea asistir el paso.

#### 4.1.4. Capacidad de natación

Los datos estimados correspondientes a habilidades de natación y resistencia de nado para las especies objetivo se muestran en la figura 5.



**Figura 6. Capacidad de natación especies objetivo.**

(Fuente: Elaboración propia, 2020)

De acuerdo a la figura 6, la especie calificada más débil corresponde a *B. maldonadoi*, la cual, posee una velocidad crítica estimada de 64 cm/s (Anexo B) y el tiempo que puede ser mantenida dicha velocidad de nado es de aproximadamente 19 minutos. Estos antecedentes permiten restringir la velocidad del flujo dentro del paso para peces, y además permiten determinar la máxima distancia entre áreas de descanso.

## 4.2. Criterios de diseño y dimensionamiento de paso para peces

### 4.2.1. Selección de alternativas

La tabla 7 representa la compatibilidad de los tipos de pasos para peces tanto con las especies objetivos como con las características del PHMA.

**Tabla 7. Compatibilidad de pasos para peces**

	Tipo de pase		Compatibilidad con especies objetivo	Compatibilidad con PHMA	Compatibilidad general
Natural	Río artificial		Compatible	Compatible	Compatible
	Rampa de rocas		Compatible	Incompatible	Incompatible
Técnico	Pase de piscinas	Escalas Artesas	Incompatible	Compatible	Incompatible
		Ranura vertical	Compatible	Compatible	Compatible
	Escala tipo Denil		Incompatible	Compatible	Incompatible
	Esclusas y Ascensores para peces		Incompatible	Compatible	Incompatible

(Fuente: Elaboración propia, 2020)

El objetivo principal que debe cumplir un pase dirigido a especies de peces nativas, es brindar una continuidad de hábitat (Link and Habit, 2015; Wilkes et al., 2017). En razón de que, las especies objetivo de este proyecto son habitantes bentónicos, se consideran incompatibles aquellos pasos para peces que no permiten una continuidad del fondo. Además, dado que la barrera transversal del PHMA es de tipo móvil, solo se pueden emplazar pasos para peces que pasan por alto la barrera de la central, siendo no aplicables aquellos tipos de pasos que se emplazan dentro del cauce. Por tales razones, solo dos tipos de pasos para peces son compatibles con el caso en estudio, río artificial y ranura vertical. Los tipos de pases mencionados conciernen a las obras diseñadas.

Los criterios generales de diseño de pase para peces dirigidos a especies nativas de Chile no difieren de las recomendaciones extranjeras y se presentan en la tabla 8.

**Tabla 8. Criterios generales de diseño**

<b>Posición óptima</b>	-En una de las laderas del río -Recto en dirección del flujo
<b>Entrada y flujo de atracción</b>	-Límite aguas abajo de barrera transversal -Angulo menor a 90° respecto al flujo del río -Conectada al fondo del río por escollera con pendiente a lo más 2H: 1V - Descarga óptima > 10% del caudal pasante por la barrera
<b>Salida</b>	-Límite aguas arriba de barrera transversal -Angulo menor a 90° respecto al flujo del río -Alejada al menos 5m de obras de aducción
<b>Longitudes, pendiente y piscinas de descanso</b>	- De acorde a las especies objetivos
<b>Mantenimiento</b>	- Revisión del pase al menos una vez al año
<b>Medida para proteger pasos</b>	- Obras perimetrales que impida el acceso a pescadores o turistas
<b>Integración con el paisaje</b>	-Plantación de vegetación local en las orillas del paso para peces, permitir que esta prolifere de forma natural

(Fuente: Elaboración propia, 2020)

Es indispensable que se cumplan los criterios presentados y solo características específicas del sitio pueden provocar que no se dé cumplimiento a uno de estos.

Los criterios propios de diseño se presentan de forma detallada en el anexo c, y es en base a estos que se desarrollan los diseños mostrados más adelante.

#### *4.2.2. Diseño de pase tipo natural*

Los planos correspondientes al diseño de un río artificial dirigido a la fauna endémica afectada por el emplazamiento del PHMA se encuentra en el anexo F y los cálculos requeridos para las dimensiones de dicho pase se hallan en el anexo D. La tabla 9, exhibe las dimensiones correspondientes a este tipo de paso de peces.

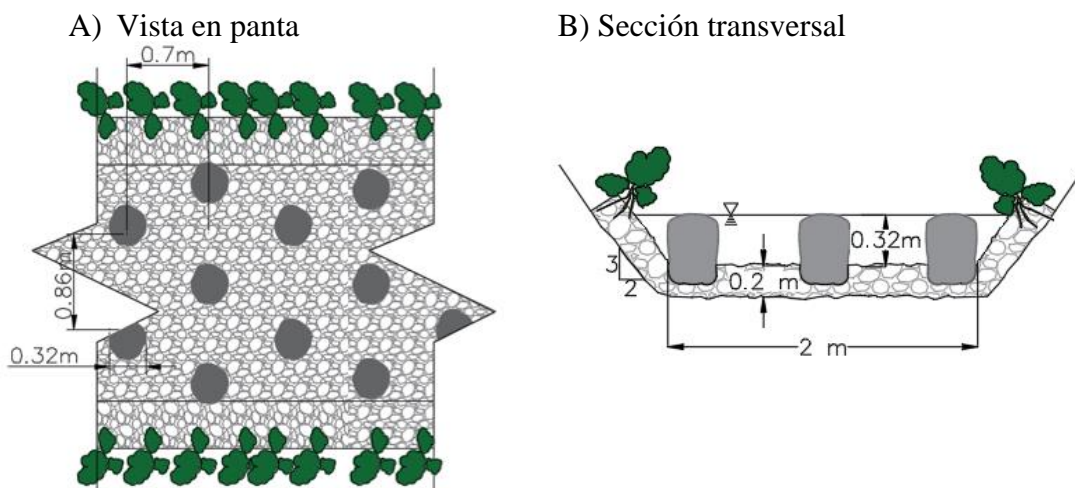
**Tabla 9. Dimensiones de río artificial**

<b>Desnivel máximo de agua:</b>	<b>DH</b>	<b>6,69 m</b>
<b>Longitud total Bypass Channel:</b>	<b>Lt</b>	<b>564,62 m/m</b>
<b>Caudal de operación:</b>	<b>Q</b>	<b>0,35 m<sup>3</sup>/s</b>
<b>Zonas de rápidos</b>		
Profundidad:	h	0,32 m
Ancho de fondo:	B	2,00 m
Talud:	z	0,67 m/m
Pendiente:	s	0,013 m/m
Longitud en pendiente	Ls	514,62 m
Diametro sustrato de fondo	d90	0,10 m
Diametro medio cantos rodados	D	0,32 m
<b>Zonas de descanso</b>		
Distancia entre piscinas de descanso:	ip	46,78 m
Número de piscinas de descanso:	N	10,00 m
Longitud piscinas:	Lp	5,00 m
Profundidad:	hp	0,60 a 0,20 m
Ancho de fondo:	Bp	2 a 3 m
Sustrato de fondo:	sf	Bolon+arena

(Fuente: Elaboración propia, 2020)

Si bien, la longitud total del río artificial es considerable, ésta se ve compensada con la alta presencia de zonas de descanso. Al mismo tiempo, este diseño está hecho para brindar condiciones de hábitat aceptables para la comunidad de peces endémicos objetivos, por lo que superar el paso para estos peces no resulta una tarea abrumadora, más bien, los peces pueden desarrollarse o habitar dentro del pase si lo desean.

De acuerdo a la tabla 9, el paso para peces de tipo natural río artificial contempla rápidos conformados por cantos rodados, los cuales se encuentran dispersos de forma escalonada tal como muestra la figura 7.

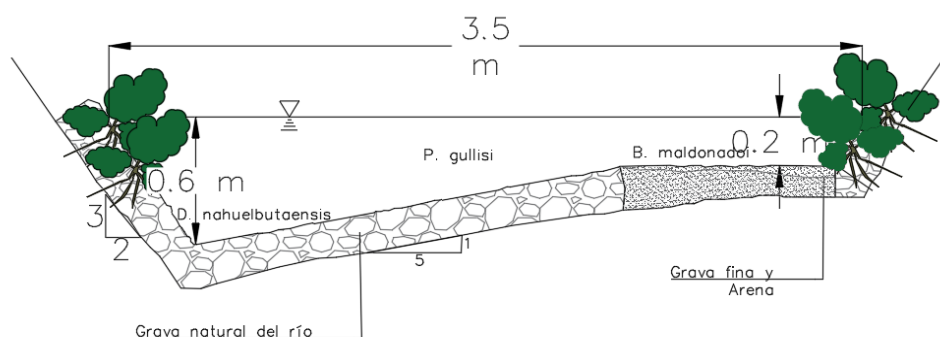


**Figura 7. Distribución en planta (A) y transversal (B) de cantos rodados en río artificial**

(Fuente: Elaboración propia, 2020)

Para las dimensiones que se muestran en la tabla 9, la velocidad media que alcanza el flujo en la zona de rápidos es de 0,51 m/s, mientras que, la velocidad máxima que adquiere es de 0,86 m/s, por lo cual, la velocidad máxima que se consigue en el fondo se estima en 0,6 m/s (Anexo D). Dicha velocidad, es inferior a la velocidad crítica de nado de la especie *B. maldonadoi*, permitiendo así el ascenso al conjunto de especies objetivo.

También, el río artificial contempla la presencia de piscinas de descanso las que se encuentran en un intervalo de 46,8 metros, cuyas zonas corresponden a una sección transversal compuesta, que otorga preferencia de hábitat tanto en profundidad, velocidad y sustrato al conjunto de especies objetivos, tal como se muestra en la figura 8.



**Figura 8. Sección transversal piscina de descanso río artificial**

(Fuente: Elaboración propia, 2020)

La velocidad media en las áreas de descanso es de 0,3 m/s (Anexo D), por ende, de acuerdo a la figura 6 las especies objetivo pueden mantener una modalidad de nado sostenida en dichas zonas.

*4.2.3. Diseño de pase tipo técnico*

Los planos correspondientes al diseño preliminar de un paso para peces de ranura vertical se encuentran en el anexo F y los cálculos para el dimensionamiento de este se hallan en el anexo D. La tabla 10 muestra las dimensiones y variables de diseño de un paso de peces de tipo ranura vertical.

**Tabla 10. Dimensiones de ranura vertical**

<b>Dimensiones Ranura Vertical</b>		
<b>Altura total a superar:</b>	ht	6,69 m
<b>Caudal de operación:</b>	Q	0,042 m <sup>3</sup> /s
<b>Longitud total de paso:</b>	Lt	380,6 m
<b>Dimensiones de Piscinas</b>		
Desnivel entre piscinas:	dh	0,04 m
Número de piscinas:	np	166
Ancho de ranura:	B	0,15 m
Profundidad media de piscina:	h	0,4 m
Ancho de piscina:	B	1,5 m
Largo de piscina:	L	2 m
Turbulencia:	P	22,9 W/m <sup>3</sup>
<b>Dimensiones Piscinas de descanso</b>		
Desnivel entre piscinas de descanso:	DHpd	<0.9 m
Número de piscinas de descanso:	N	8,00 m
Volumen piscina de descanso	Vpd	6,00 m <sup>3</sup>
Ancho piscina de descanso:	Bpd	3,00 m
Longitud piscina de descanso:	Lpd	4,00 m
Profundidad de piscina de descanso:	hpd	0,40 m
Sustrato de fondo:	d50	50,00 mm

(Fuente: Elaboración propia, 2020)

Respecto a los diseños dirigidos a especies migradoras del hemisferio norte, la principal diferencia presentada hace referencia al desnivel entre piscinas de descanso, el cual fue

necesario reducirlo en 1 cm respecto a la recomendación de O'Connor et al. (2017), esto con el fin de lograr velocidades de flujo y turbulencia adecuada para los peces objetivo.

### 4.3. Análisis de factibilidad funcional y económica

#### 4.3.1. Factibilidad funcional

La tabla 11 muestra los resultados del análisis de factibilidad funcional realizado a los pasos para peces diseñados, elaborado en el anexo E.

**Tabla 11. Análisis de factibilidad funcional de pasos para peces diseñados**

Tipo de paso	Funcionamiento hidráulico	Funcionamiento ecológico	Evaluación del paso
	% Cumplimiento	% Cumplimiento	% Cumplimiento
<b>Río artificial</b>	86%	82%	70%
<b>Ranura vertical</b>	79%	63%	49%

(Fuente: Elaboración propia, 2020)

#### a) Funcionamiento hidráulico

El diseño del canal río artificial, producto de la gran extensión que requiere, presenta falencias tanto en la posición óptima como en la ubicación de la salida. Por otro lado, el diseño del paso ranura vertical presenta dificultades en la integración con el paisaje; además, posee un bajo flujo de atracción y al igual que el diseño natural su extensión es considerable por lo que su posición no es la más recomendada.

#### b) Funcionamiento ecológico

Ambos diseños consideran la capacidad de natación de la especie objetivo más débil, por lo que dan total cumplimiento a este criterio. Sin embargo, la falencia se presenta al considerar la preferencia de hábitat. El diseño natural, si bien, no alcanza un 100% de preferencia de hábitat para la comunidad de especies objetivos, logra un valor que supera el 50%, lo cual se considera aceptable. No obstante, el diseño técnico al ser un diseño rígido, imposibilita dar un cumplimiento de hábitat aceptable a una comunidad de especies dentro de un mismo paso, por tal razón, este tipo de paso logra un porcentaje de cumplimiento relativamente bajo.



#### 4.3.2. Factibilidad económica

La inversión estipulada para llevar a cabo el PHMA es de 50 millones de dólares, mientras que la inversión que se estima para llevar a cabo los diseños de pasos para peces diseñados son los que se observan en la tabla 12, establecido de acuerdo al anexo E.

**Tabla 12. Análisis de factibilidad económica de pasos para peces diseñados**

<b>Tipo de paso</b>	<b>Inversión estimada \$ US</b>	<b>% de inversión de la central</b>
<b>Río artificial</b>	304.443	0,61%
<b>Ranura vertical</b>	291.262	0,58%

(Fuente: Elaboración propia, 2020)

Ambos diseños representan un bajo costo respecto a la inversión total del PHMA, por lo que su implementación, no sería un inconveniente desde el punto de vista económico. Debido al bajo costo del desarrollo de paso para peces y al gran beneficio que estos presentan para el medio acuático, debiese evaluarse la obligatoriedad de esta medida desde el inicio de cada proyecto hidroeléctrico.

Según lo observado en la tabla 12, desde la perspectiva económica, para el PHMA resulta más viable la implementación de un pase de tipo técnico que uno de tipo natural. Sin embargo, las diferencias de inversión son mínimas respecto a las diferencias que ambos diseños presentan en la factibilidad funcional. Por tal motivo, se recomienda llevar a cabo un paso para peces tipo río artificial en el PHMA.

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1. Conclusiones**

Los peces nativos presentes en el río Cholguán representan fielmente la situación de Chile; ya que poseen un alto riesgo de conservación, tamaños pequeños, ausencia de patrones migratorios, etc. El alto riesgo de conservación que presentan las especies nativas de Chile, es un claro indicio de que las medidas de mitigación de impacto ambiental empleadas cuando se intervienen ríos o lagos del país presentan falencias, por lo que es necesario realizar acciones correctivas que mejoren la situación.

En Chile, la implementación de obras de paso para peces, forma parte de las alternativas de mitigación frente a los impactos ambientales asociados a la fauna íctica. Para que dicha medida de mitigación sea adecuada, el diseño de un paso para peces debe ser concebido a partir de los requerimientos sitio específicos del lugar a intervenir.

Los criterios de diseño de pasos para peces, dirigidos a especies endémicos de Chile, deben considerar la preferencia de hábitat que los peces presentan, puesto que estos no poseen marcados patrones migratorios requieren de una continuidad de hábitat.

Desde el punto de vista económico la implementación de una obra de paso para peces no supera el 1% del presupuesto total de una central hidroeléctrica de pasada, por lo que la implementación de este tipo de solución no requiere de grandes esfuerzos económicos.

De acuerdo con este proyecto, el tipo de paso para peces que mejor se adecua con los peces nativos de Chile, corresponden a los pasos de tipo río artificial, puesto que, la flexibilidad en el diseño de estos además de asistir el paso, brinda una continuidad de hábitat para la fauna íctica. Adicionalmente, un río artificial puede ser implementados en barreras ya existentes pasando por alto la estructura de esta.

## 5.2. Recomendaciones

Dado a la falta de conocimiento de las especies nativas de Chile, se requiere fomentar la realización de estudios que permitan establecer ampliamente las habilidades de natación de las diversas especies de peces nativos de Chile, junto con esto, elaborar estudios con modelos físicos a escala de pasos para peces que permitan determinar el comportamiento que los peces nativos adoptan dentro de estos. De esta manera lograr en un futuro diseños de pasos para peces que garanticen el franqueo por parte de de la fauna íctica nativa y reduzca las incertezas generadas por las estimaciones y supuestos realizados en el presente.

Mientras exista falta de conocimiento de las especies en cuestión, se deben diseñar pasos para peces lo más versátil posible, que además permitan realizar modificaciones en su construcción si estos no operan de la forma esperada. Pero una vez definidas las capacidades de nado de las especies en cuestión y el comportamiento que estas adoptan dentro de un paso para peces, se deben mejorar las exigencias y normativas aplicadas en la actualidad respecto a los impactos generados sobre la fauna íctica, definiendo la obligatoriedad de la implementación de paso para peces a excepción de casos justificados.

Dado que, el futuro energético de Chile apunta a la construcción de gran número de centrales hidroeléctricas de pasada y estas se caracterizan por tener alturas de muro relativamente bajas, es adecuado recomendar en estos casos, la implementación de pasos de peces de tipo natural, particularmente aquellos de tipo río artificial.

Para el diseño de futuros pasos para peces se recomienda elaborar estudios que definan claramente las propiedades del sitio a intervenir, como lo son la estabilidad del suelo, topografía detallada e hidrología en el punto de interés.

## REFERENCIAS

- Armstrong, G. Aprahamian, M. Fewings, G. Gough, P. Reader, N. Varallo, P. 2010. *Guidance notes on the Legislation, selection and approval of fish passes in England and Wales*. Environment Agency Fish Pass Manual. Uk.
- Arratia, G. (1987). *Gayana Oceanol.* 4(2): 129-137.
- Arratia, G. (1983). *Preferencias de hábitat de peces siluriformes de aguas continentales de Chile. Studies on neotropical fauna and environment* 18(4): pp. 217-237.
- Arratia, G. 1981. Géneros de peces de aguas continentales de Chile. *Publicación Ocasional del Museo de Historia Natural*, Santiago, 34:1-108.
- Beauchamp, V., Stromberg, J. y Stutz, J. 2007. Flow regulation has minimal influence on mycorrhizal fungi of a semi-arid floodplain ecosystem despite changes in hydrology, soils, and vegetation. *Journal of Arid Environments* 68, 188–205.
- Bell M. C. (1990). *Fisheries Handbook of Engineering Requirements and Biological Criteria*. 2nd ed. Portland, Oregon.
- Campos H., Ruiz V., Gavilán JF. & Alay F. (1993). Pesci del fiume Bío-Bío. *Pubblicazione di divulgazione VOL.* 5:7-100.
- Central Hidroeléctrica Molinos de Agua. 2010. Estudio de Impacto Ambiental. [en línea] <<https://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=5469300>>. [Consultado en 2020]
- Central Hidroeléctrica Molinos de Agua. 2010. Adenda N° 1. [en línea] <<https://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=6231569>> [Consultado en 2020]
- Centro de Ecología Aplicada. (CEA) (2008). Determinación de Caudales Ecológicos en Cuencas con Fauna Íctica Nativa y en Estado de Conservación. S.I.T. N° 187. Chile; Dirección General de Agua (DGA).
- Clay and Charles (1995). *Design of Fishways and Other Fish Facilities*. 2nd ed. Florida.: Lewis Publishers

- Cowx, I. and Welcomme, R. (1998). *Rehabilitation of rivers for fish*. Oxford: Published by arrangement with the Food and Agriculture Organization of the United Nations by Fishing News Books.
- DVWK. (2002). "Fish passes: Design, dimensions and monitoring." Food and Agriculture Organization of the United Nations in arrangement with German Association for Water Resources and Land Improvement (DVWK), Rome.
- Dyer, B. 2000. Systematic review and biogeography of the freshwater fishes of Chile. *Estudios Oceanológicos*, Chile 19: 77-98.
- EULA. 2000. Determinación del Caudal Ecológico Mínimo del Proyecto Hidroeléctrico Quilleco en el río Laja, considerando variables asociadas a la biodiversidad y disponibilidad de hábitat.
- Franklin, P. Gee, E. Baker, C. & Bowi, S. (2018). *New Zeland Fish Passage Guidelines For structures up to 4 metres*. National Institute of Water & Atmospheric Research Ltd.
- García and Lancaster (2006). Aquatic Habitat Modeling of Chilean Native Fish in a Reach of the Biobío River.. 1st ed. Boise, Idaho.: M.S. Thesis.
- Habit E. (1994). Contribución al conocimiento de la fauna íctica del río Itata. Boletín de la Sociedad de Biología de Concepción, Chile 65: 143- 147.
- Habit E., Dyer B. & Vila I. (2006). Estado de conocimiento de los peces dulceacuicolas de Chile. *Gayana (Concepción)*, 70(1), pp.100-113.
- Katopodis C. 1992. *Introduction to Fishway Design*. Freshwater Institute, Central and Arctic Region, Department of Fisheries and Oceans: Winnipeg, Manitoba, Canadá.
- Laborde, A. González, A. Sanhueza, C. Arriagada, P. Wilkes, M. Habit, E. & Link, O. (2016) Hydropower Development, Riverine Connectivity, and Non-sport Fish Species: criteria for Hydraulic Design of Fishways. *River Research and Applications*, 32(9), pp.1949-1957.
- Laborde Anita, Habit Evelyn, and Link Oscar. "Hydropower Dams Threaten Freshwater Chilean Fish Species: What Dams and What Species?" E3S Web of Conferences 40 (2018): 03032.

- Larinier, M. (1992). Passes a Bassins Successifs, Prébarrages et Rivières Artificielles. Bull. Fr. Pêche Piscic., (326-327): 45-72.
- Larinier, M., Travade, F., Porcher., (2002): Fishways: biological basis, design criteria and monitoring. Bull. Fr. Peche Piscic., 364 suppl., 208p. ISBN 92-5-104665-4
- Larinier, M. (2002). Pool fishways, pre-barrages and natural bypass channels.
- Ley 19300, sobre bases generales del medio ambiente. Ministerio de Medio Ambiente, Chile. Actualizado a 2019.
- Ley 18.892, sobre bases generales de pesca y acuicultura. Ministerio de Medio Ambiente, Chile. Actualizado a 2019.
- Link O., & Habit E. (2015). Requirements and boundary conditions for fish passes of non-sport fish species based on Chilean experiences. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 14(1), pp.9-21.
- Mallik, A. y Richardson, J. (2009). Riparian vegetation change in upstream and downstream reaches of three temperate rivers dammed for hydroelectric generation in British Columbia, Canada. *Ecological Engineering* 35, 810–819.
- Meier, C. (2007). *Paso de Peces en Centrales Hidroeléctricas: Aproximaciones para el caso chileno*. Concepción, Chile
- Meier, C. (2011). *Hidroelectricidad realmente sustentable para Chile*. Chile.
- Ministerio de Energía (2016). Estudio de Cuencas. Análisis de las condicionantes para el desarrollo hidroeléctrico en las cuencas del Maule, Biobío, Toltén, Valdivia, Bueno, Puelo, Yelcho, Palena, Cisnes, Aysén, Baker y Pascua. Chile. p. 104.
- MMA (2020), *Inventario Nacional de Especies de Chile*.
- Muñoz-Ramírez, C., Jara, A., Beltrán-Concha, M., Zúñiga-Reinoso, A., Victoriano, P. y Habit, E. 2010. Distribución de la familia Diplomystidae (Pisces: Siluriformes) en Chile: nuevos registros. *Boletín de Biodiversidad de Chile* 4: 6-17.
- O'Connor, J., Mallen-Cooper, M. and Stuart, I. (2015). Performance, operation and maintenance guidelines for fishways and fish passage works. Arthur Rylah Institute for Environmental Research Technical Report No. 262 for the Water and Catchments Group, Department of Environment, Land, Water and Planning. Arthur Rylah Institute

for Environmental Research, Department of Environment, Land, Water and Planning, Heidelberg, Victoria.

- O'Connor, J., Stuart, I. & Jones, M. (2017). Guidelines for the design, approval and construction of fishways. Arthur Rylah Institute for Environmental Research. Technical Report Series No. 274. Department of Environment, Land, Water and Planning, Heidelberg, Victoria.
- Özbilgin, H., M. Pehlivan & F. Basaran. (2011). Maximum swimming speed predictions for *Mullus barbatus* (Linnaeus, 1758) and *Diplodus annularis* (Linnaeus, 1758). *Journal Turk Zoology*, 35: 79-85.
- Peake, S. (2004). An Evaluation of the use of critical swimming speed for determination of culvert water velocity criteria for Smallmouth Bass. *Transactions of the American Fisheries Society*, 133: 1472-1479.
- Piedra, P. Habit, E. Oyanedel, A. Colin, N. Solis-Lufi, K. González, J. Jara, A. Ortiz, N. Cifuentes, R. (2012) Patrones de desplazamiento de peces nativos en el Río San Pedro (cuenca del Río Valdivia, Chile). *Gayana* 76(1):59–70
- Ruiz V., López M., T. Moyano, H. & Marchant M. (1993). Ictiología del alto Biobío: Aspectos taxonómicos, alimentarios, reproductivos y ecológicos una discusión sobre la Hoya. *Gayana zoología*, Chile, 57 (1), pp. 77-88.
- Ruiz VH. (1993). Ictiofauna del río Andalién. *Gayana zoología*, Chile 57 (2): 109-278.
- Schilt, R. (2006). Developing fish passage and protection at hydropower dams. *Applied Animal Behaviour Science* 104 (2007) 295–325.
- Travade, M. Larinier, S. Boyer-Bernard and J. Dartiguelongue. (1998). *Fish migration and fish bypasses*. Oxford, UK: Blackwell Science Ltd. Publisher.
- Victoriano P, Vera I, Olmos V, Dib M, Insunza B, Muñoz-Ramirez C, Montoya R, Jara A, Habit E. (2012). Idiosyncratic patterns of genetic diversity of native fishes from Río San Pedro (Valdivia River Basin, Región de los Ríos, Chile): a system from glaciated region in southern Chile. *Gayana* 76: 71–85. DOI:10.4067/S0717-65382012000100007

- Vila I, Habit E. (2015). Current situation of the fish fauna in the Mediterranean region of Andean river systems in Chile. *Fishes in Mediterranean Environments* 2015(002): 1–19.
- Vila, I. Fuentes, L. Contreras M., (1999). Peces límnicos de Chile. *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural*, Chile 48:61-75.
- Vila, I. & Pardo, R. (2008). Peces límnicos. En: Biodiversidad de Chile, Patrimonio y desafíos, (Eds. Conama, Ocho Libros. Santiago de Chile, 640 pp.
- Villena, M. (2017) Caracterización de obras de paso para peces en embalses con resolución de calificación ambiental. Proyecto de título. Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío.
- Wilkes, M. Lee B. Craig B. Silva, L. O'Connor, J. Jones, M. Stuart, I. Habit, E Link, O. & Angus, J. (2017). Fish-Net: Probabilistic Models for Fishway Planning, Design and Monitoring to Support Environmentally Sustainable Hydropower." *Fish and Fisheries* 19.4 : 677-97. .
- Williams, J.G., Armstrong, G., Katopodis, C., Larinier, M., Travade, F. (2012) Thinking like a fish: A key ingredient for development of effective fish passage facilities at river obstructions. *River Research and Applications*, 28(4): 407-417. 10.1002/rra.1551.



## **ANEXOS**

**ANEXO A: CARACTERIZACIÓN DE PHMA**

**ANEXO B: CARACTERIZACIÓN DE ESPECIES OBJETIVO**

**ANEXO C: TIPOS DE PASOS PARA PECES Y CRITERIOS DE DISEÑO**

**ANEXO D: DIMENSIONAMIENTO DE PASOS PARA PECES**

**ANEXO E: ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD FUNCIONAL Y ECONÓMICA**