

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Juan Marcus Shwenk

**VERTEDORES DE CAUDAL
ECOLÓGICO EN TOMAS DE MINI
CENTRALES HIDROELÉCTRICAS**

PROYECTO DE TÍTULO PRESENTADO EN CONFORMIDAD A LOS REQUISITOS PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

ESTEBAN ALEJANDRO SEPÚLVEDA SANDOVAL

CONCEPCIÓN, SEPTIEMBRE DE 2014

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al departamento de ingeniería Civil y Ambiental y a sus profesores quienes me entregaron los conocimientos y aptitudes para poder ser un Ingeniero Civil, en especial a mi profesor guía quien fue muy importante en la última etapa de mi carrera.

A mis padres por apoyarme incondicionalmente en este camino para llegar a ser un profesional, a mis abuelos quienes con orgullo relatarán mi logro, a mis compañeros por hacer esta etapa una de las más lindas, y a toda la gente que me rodea que sin duda fue importante en todo momento.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de título, con el cual concluyo la etapa de pregrado de la carrera Ingeniería Civil, a quienes son parte de mi vida y han sido fundamentales para mi desarrollo como persona íntegra y social:

Mis padres, Alejandro Sepúlveda Osses y Verónica Sandoval Cofré

Mis abuelos, Juan Sandoval Noriega y María Cofré

Mi novia Victoria Astudillo Correa por el afecto, confianza y preocupación

Y por último a mi hijo Tomás Sepúlveda Astudillo, que sin duda es mi mayor motivación para ser un gran Ingeniero Civil.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. Contexto.....	3
1.2. Problema investigativo	3
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.3.3. Limitaciones de la investigación	4
2. METODOLOGÍA.....	4
2.1. Revisión Bibliográfica	4
2.1.1. Estructura y funcionamiento de ecosistemas acuáticos.....	4
2.1.1.1. Régimen hidrológico y funcionalidad.....	4
2.1.1.2. Relaciones intersistémicas y funcionalidad	6
2.1.2. Efectos causados por embalses.....	6
2.1.3. Origen del concepto de caudal ecológico	8
2.2. Métodos para la obtención del caudal ecológico.....	10
2.2.1. Métodos hidrológicos	10
2.2.2. Métodos hidráulicos	10
2.2.3. Métodos de simulación de hábitat	11
2.2.4. Métodos holísticos.....	11
2.3. Recopilación de manuales y normas DGA	11
2.3.1. Manual de normas y procedimientos para la administración de recursos hídricos .	11
2.4. Entrevista a DGA.....	13
2.5. Alternativas de vertedores de caudal variable	14
2.5.1. Alternativa 1: Compuerta vertical con orificios de distinto diámetro	14
2.5.1.1. Compuerta vertical.....	14

2.5.1.2.	Solución adaptable a lo Requerido	15
2.5.1.3.	Criterios de selección.....	15
2.5.1.4.	Memoria de cálculo	16
2.5.2.	Alternativa 2: Compuerta radial, con abertura en su base.....	19
2.5.2.1.	Compuerta radial.....	19
2.5.2.2.	Solución adaptable a lo requerido.....	20
2.5.2.3.	Criterios de selección.....	20
2.5.2.4.	Memoria de cálculo	20
2.5.3.	Alternativa 3: Orificio al pie de canal de derivación con un tapón con agujero de diámetro variable.....	23
2.5.3.1.	Funcionamiento	23
2.5.3.2.	Criterios de selección.....	23
2.5.3.3.	Memoria de calculo	23
2.5.4.	Alternativa 4: Válvula de compuerta reguladora de flujo	26
2.5.4.1.	Válvula compuerta.....	26
2.5.4.2.	Criterios de selección.....	26
2.5.4.3.	Memoria de calculo	27
3.	ANALISIS DE RESULTADOS	29
3.1.	Variabilidad de caudal ecológico en ríos.....	29
3.2.	Métodos de obtención de caudal ecológico	30
3.2.1.	Evaluación de los métodos para la obtención del caudal ecológico.....	30
3.2.2.	Comentarios.....	32
3.3.	Normas técnicas y legales de la DGA con respecto a caudales ecológicos en mini centrales hidroeléctricas	32
3.4.	Análisis de entrevista a DGA.....	33
3.5.	Alternativas de vertedores de caudal ecológico.....	33
4.	DISCUSIÓN	35

4.1. Control de operación.....	35
4.2. Sección fija v/s sección variable	35
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	36
6. BIBLIOGRAFÍA	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Modelo teórico de la influencia del régimen hídrico sobre los patrones y procesos ecológicos.5	
Figura 2: Esgurrimiento de una compuerta radial21	
Figura 3: Válvula compuerta operando con una abertura “a”27	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Efectos y medidas de mitigación del impacto ambiental del agua en un río.....8	
Tabla 2: caudal ecológico en litros por segundo para el estero Quillaileo17	
Tabla 3: Coeficientes de contracción de la válvula compuerta con disco27	
Tabla 4. Funciones ecológicas de diferentes niveles de caudal.....29	
Tabla 5. Comparación de métodos para determinar un caudal ecológico en relación a.....31	
Tabla 6. Comparación de métodos para determinar un caudal31	
Tabla 7. Comparación de criterios de distintas alternativas de obras hidráulicas de caudal variable34	

VERTEDORES DE CAUDAL ECOLÓGICO EN TOMAS DE MINI CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Autor: Esteban Sepúlveda Sandoval

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

Correo electrónico: essepul@alumnos.ubiobio.cl

Profesor Patrocinante: Juan Marcus Shwenk

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

Correo Electrónico: jmarcus@jms.cl

RESUMEN

El concepto de caudal ecológico, se establece para poder preservar las condiciones naturales de los cauces, en proyectos donde se desvía un caudal del río de manera de darle otro uso al recurso hídrico. Particularmente en mini centrales, donde se capta un caudal que luego de pasar por la turbina es restituido al río, existen tramos aguas abajo de la obra de toma, en donde el flujo se reduce de forma brusca y que altera tanto la flora como la fauna propia del río.

El organismo a cargo de la administración de recursos hídricos, la Dirección General de Aguas (DGA), luego de múltiples formas de obtención de caudal ecológico, publica a finales de 2013 el decreto supremo N° 14, el cual velará por la entrega de este flujo y de forma variable mes a mes.

El objetivo de este estudio, será entregar distintas alternativas de obras hidráulicas, que logren entregar una variabilidad a través del tiempo, en función de los caudales ecológicos otorgados por la DGA.

Además, se mencionan las diferentes formas de medición aplicadas a secciones variables, para determinar si el caudal entregado cumple las condiciones impuestas por los derechos de aguas.

Palabras claves: caudal ecológico, vertedores, alternativas, dirección general de aguas.

Total de palabras: $8793 + 3 \times 250 = 9543$ palabras

ECOLOGICAL FLOW POURING IN MINI HYDROPOWER.

Author: Esteban Sepúlveda Sandoval

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

E-mail: essepul@alumnos.ubiobio.cl

Sponsor teacher: Juan Marcus Shwenk

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

E-mail: jmarcus@jms.cl

ABSTRACT

The concept of ecological flow is established in order to preserve the natural conditions of the channels, in projects where a river flow is diverted to give another use to the water resource. Particularly in mini plants, where the captured river flow is returned to the river after passing through the turbine, there are stretches downstream of the intake, where the flow is reduced sharply and altering both the flora and fauna of the river.

The agency responsible for managing water resources, the Water Directorate (DGA), after multiple ways to obtain ecological flow, published at the end of 2013 the supreme Decree No. 14, which will ensure the monthly delivery of this flow and variably. The aim of this study is to provide different alternatives of waterworks that are able to deliver variability over time, depending on environmental flows provided by the DGA. In addition, different forms of measurement applied to variable sections to determine whether the delivered flow fulfills the conditions imposed by water rights are mentioned.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto

Una mini central hidroeléctrica se utiliza para obtener energía eléctrica. Son centrales que aprovechan la energía cinética de los cauces naturales de agua y utilizan el desvío de una fracción del caudal de un río, con el fin de aprovechar la caída del agua para lograr el movimiento de las turbinas. Estas se encuentran conectadas a un generador, el que produce energía eléctrica.

De acuerdo a lo definido en la ley 20.257 una mini central hidroeléctrica es considerada renovable no convencional, en caso de que su potencia sea menor a 20 MW.

Dicho lo anterior, el caudal natural que posee el río se verá afectado en algunos tramos, reduciendo de forma significativa su caudal inicial. Esto a su vez, condicionará tanto la flora y la fauna aguas abajo de la bocatoma.

De aquí nace la idea de caudal ecológico, que es el flujo mínimo a mantener dentro de un río, entre la captación y restitución, principalmente para conservar poblaciones de peces o para asegurar usos ambientales como la recreación y la pesca.

1.2. Problema investigativo

El organismo a cargo de otorgar caudales ecológicos es la Dirección General de Aguas (DGA) el cual establece en el DS N°14 (2013) que este debe ser 20% del caudal medio mensual correspondiente a la cuenca en estudio, presentándose de esta forma un régimen variable mensualmente lo cual genera un desafío extra a la hora de seleccionar la mejor opción para su entrega.

En proyectos de mini centrales anteriores, generalmente se optó por entregar un caudal fijo a lo largo del año, a través de obras hidráulicas de sección fija, opción que no cumple con la normativa impuesta por la DGA a fines de 2013.

En este trabajo, además de mencionar la importancia de la existencia de una variabilidad de caudal ecológico en proyectos de mini centrales, se exponen diferentes obras hidráulicas adaptadas a entregar este caudal de forma variable mes a mes, para así cumplir de manera satisfactoria con la normativa.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Proponer distintas alternativas de vertedores para el paso del caudal ecológico variable en mini centrales hidráulicas

1.3.2. Objetivos específicos

- Describir la importancia del caudal ecológico en ríos y su variabilidad
- Mencionar métodos de obtención de este caudal en la actualidad
- Describir el aspecto legal y técnico del caudal ecológico por parte de la DGA
- Presentar y analizar tipos de vertedores para el paso de este caudal en mini centrales hidroeléctricas

1.3.3. Limitaciones de la investigación

Este estudio contempla proyectos de mini centrales hidroeléctricas que no se someten a un estudio de impacto ambiental, que cuentan con un azud de altura menor a 5 mts., captación menor a 2000 L/s y con una toma lateral de caudal.

2. METODOLOGÍA

2.1. Revisión Bibliográfica

2.1.1. Estructura y funcionamiento de ecosistemas acuáticos

2.1.1.1. Régimen hidrológico y funcionalidad

Un nuevo paradigma del “flujo natural” postula que las variaciones hidrológicas (con valores característicos de sus elementos críticos) son claves para mantener la funcionalidad de los ecosistemas lóticos (Arthington et al., 1992; Richter et al., 1996; Poff et al., 1997).

Según Poff et al. (1997), existen al menos cinco elementos críticos del régimen hídrico que regulan los procesos ecológicos en ríos, los cuales son:

- Magnitud de la descarga: es el volumen de agua pasando por una sección por unidad de tiempo.
- Frecuencia: es cuán a menudo se encuentra un caudal por encima de una magnitud dada para un intervalo de tiempo específico.

- Duración: es el periodo de tiempo asociado con una condición de flujo específica.
- Predictibilidad: es definido como la regularidad con que ocurre una cierta magnitud de descarga. Esta regularidad puede ser definida formal o informalmente y con referencias a distintas escalas de tiempo, por ejemplo, los picos anuales de caudal pueden ocurrir con baja o alta predictibilidad.
- Tasa de cambio: se refiere a cuán rápido cambian los caudales de una magnitud a otra.

El modelo desarrollado por este autor (Poff et al., 1997) señala que estos cinco elementos pueden modificar la condición física y química del agua, los recursos alimenticios, las interacciones bióticas y la heterogeneidad del hábitat, lo que finalmente produce cambios en los patrones y procesos ecológicos (figura 1).

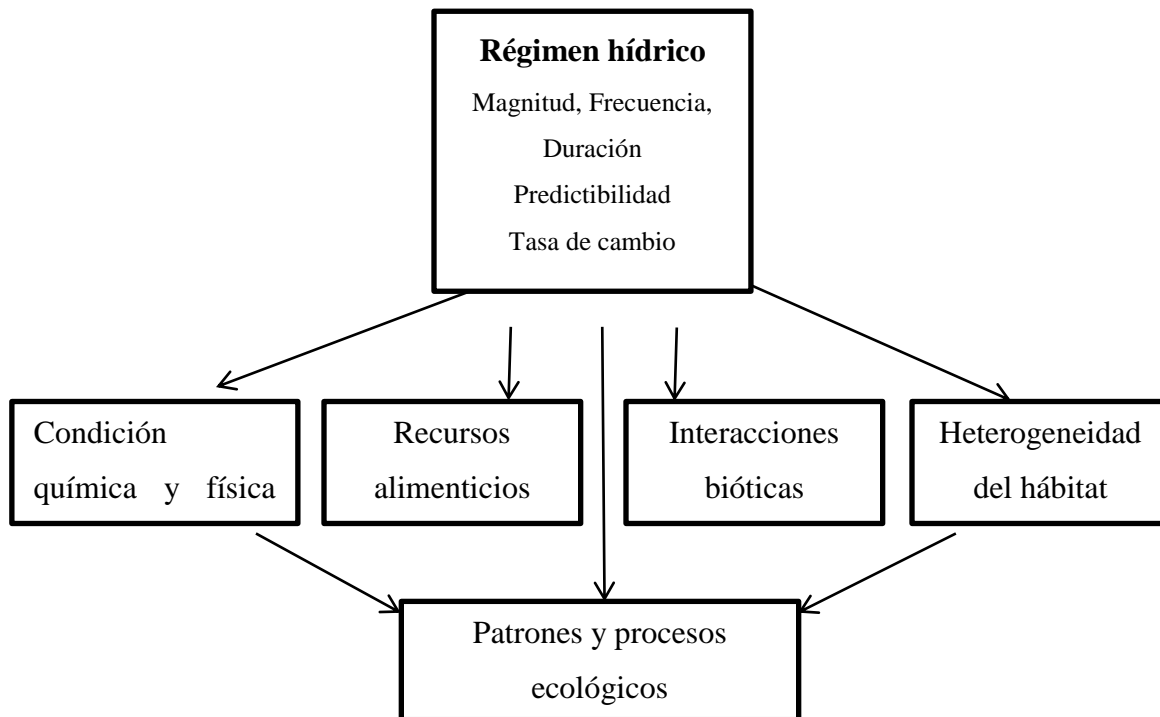


Figura 1: Modelo teórico de la influencia del régimen hídrico sobre los patrones y procesos ecológicos.

Fuente: Poff et al., 1997

2.1.1.2. Relaciones intersistémicas y funcionalidad

Recientes conceptos en la ecología de arroyos afirman que la principal entrada de material orgánico e inorgánico a los ecosistemas acuáticos proviene de la interfase tierra-agua (Stanley et al., 1991; Bayley, 1995). Las interacciones entre sistemas acuáticos y terrestres incluyen la modificación del microclima (luz, temperatura, humedad), alteración de la entrada de nutrientes, aporte de materia orgánica a arroyos y áreas de inundación y retención de las entradas de nutrientes (Stanley et al., 1991). La vegetación ripariana terrestre juega roles muy importantes en los sistemas acuáticos influyendo en:

1. La cantidad y calidad de la luz disponible para los productores primarios (autótrofos)
2. La entrada de materia orgánica al cauce (esta entrada, en general, es la mayor fuente de ingreso de carbono al sistema acuático)
3. Procesamiento de la materia orgánica (se ha estudiado que la tasa de descomposición de hojas o restos de maderas provenientes de zonas riparianas depende de la especie vegetal que entra al cauce)
4. Abundancia y composición de detritívoros.
5. Disponibilidad de alimentos para herbívoros, entre otros (Stanley, 1991; Allan, 1995).

De esta manera, cuando se propone conservar el ecosistema lótico muchos investigadores enfatizan la importancia que tienen las relaciones intersistémicas en la mantención de los flujos intrasistémicos.

2.1.2. Efectos causados por embalses

El flujo natural de energía y materia de los ecosistemas lóticos, que los mantiene en un cierto estado de desarrollo, es impactado por la construcción de minicentrales provocando tanto una alteración del régimen hidrológico, como una alteración en el flujo de nutrientes y en la entrada de energía al sistema.

En cuanto a la modificación en el régimen hidrológico, en general, las minicentrales causan la disminución de los caudales y de su predictibilidad aguas abajo del azud (Postel y Richter, 2003).

En la figura 1 (Anexo A) se presenta un ejemplo de cómo un embalse puede alterar los patrones del flujo natural. En la parte (a) se distingue como flujos bajos naturales permiten un continuo de agua transportando materiales y energía aguas abajo, así como también permite el desplazamiento de la macro fauna acuática (en general depredadores). Se observa que el agua subterránea alcanza un nivel suficiente como para suplir a la vegetación adyacente al cauce. También caudales muy altos inundan zonas adyacentes permitiendo intercambios intersistémicos. Sin embargo, cuando se altera el régimen temporal disminuyendo los caudales y la variabilidad (parte b de la figura 1) el continuo de agua puede interrumpirse, modificando claramente el flujo de materiales y deteriorando la calidad del agua. Es por esto que la variabilidad de flujo en un cauce intervenido es de suma importancia para el desarrollo y conservación natural de especies que allí habitan. Esta modificación del estado natural del río es aplicable a obras que impiden el paso del flujo normal, particularmente para minicentrales hidroeléctricas.

A su vez, la disminución de la variabilidad y predictibilidad también contribuye al aumento de la biomasa de autótrofos y plantas mayores (Allan, 1995, Poff y Palmer, 1997, Valett et.al., 1997). Este crecimiento de plantas genera una mayor resistencia al flujo provocando una reducción en la habilidad del cauce para transportar el agua de las crecidas (Allan, 1995).

Por otra parte, (Poff y Ward, 1989) postula que la alta variabilidad y/o impredecibilidad en el régimen provee un modelo físico en el cual los procesos abióticos son importantes en controlar los procesos y contribuir a los patrones ecológicos observados. Los regímenes hídricos más predecibles conducen al desarrollo de interacciones bióticas más fuertes como competencia o depredación, las cuales pueden influir directamente sobre patrones ecológicos observados. Algunos de los efectos indirectos y a nivel poblacional o comunitario por la regulación de la magnitud y temporalidad del flujo se resumen en la tabla 1 (anexo A).

En lo que se refiere a la alteración del flujo de nutrientes y entradas de energía al sistema, las minicentrales actúan como barreras para nutrientes. Los sedimentos en grandes reservorios de agua tienden a depositarse en el fondo de los mismos. Esto produce que aguas abajo disminuya la concentración de sedimentos, lo cual sumado a la disminución de la variabilidad del régimen hídrico contribuye al aumento de la abundancia del perifiton o macrófitas (Standford y Ward, 1979).

Además las minicentrales también generan una variación de las temperaturas, cuando se libera el agua del fondo de la barrera se reduce la amplitud de los cambios diarios y estacionales de las temperaturas aguas abajo del azud. (Pett y Amoros, 1996). Esto puede afectar el balance energético de los organismos y sus tasas vitales (Poff y Hart, 2002). Específicamente, se ha identificado un impacto significativo en la fauna bentónica (se reduce la riqueza de especies) (Allan, 1995).

Para complementar lo anterior, se muestra la tabla 1 que destaca el importante rol que cumple la variabilidad de caudal en un cauce.

Tabla 1: Efectos y medidas de mitigación del impacto ambiental del agua en un río

Sistema acuático	
Efectos	Medidas de mitigación
<ul style="list-style-type: none"> • El agua es el factor más importante y su principal característica es que constituye un ecosistema extremadamente frágil. La alteración que va a sufrir el caudal de agua crea el impacto mas fuerte • La interrupción de la corriente de agua se traduce es una alteración directa sobre la población piscícola, disminuyendo además la capacidad de autodepuración del cauce en el tramo interrumpido • Eliminar la variabilidad de caudal de un cauce en el tiempo, impacta aguas abajo de la barrera provocando que no hayan periodos de estiaje. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento de caudales ecológicos y de servidumbre. • Restituir al cauce el agua utilizada y mantenimiento del cauce ecológico. • Asegurar una variabilidad en la entrega de caudal ecológico para simular el flujo natural • Instalar pasos de peses en el azud para permitir la circulación en ambos sentidos de las especies que allí habitan

Fuente: propia

2.1.3. Origen del concepto de caudal ecológico

Frente a la creciente demanda del agua, a finales de los años 20 en el Estado de Oregon se suscita el primer caso donde se limita la otorga de un derecho de agua para proteger la calidad escénica de las cascadas de agua en el río “Colombia River Gorge”. Sin embargo, es en el año 1971

cuando por primera vez en un estatuto gubernamental se define y se estipula la mantención de un “instream flow”. En este estatuto (Revised Code of Washington [RCW] 90/54.020) del Estado de Washington se estipulaba lo siguiente: “Los ríos permanentes deben ser mantenidos con flujos bases necesarios para la prevención de la vida silvestre, de los peces y de valores ambientales”.

Es en esa década de los setenta, cuando gestores y científicos comienzan a preocuparse específicamente por la reducción en la cantidad de agua corriente abajo de los embalses. A partir de la fecha surgió el término “minimum instream flow” incorporado en medidas o instrumentos que obligaban a mantener un flujo mínimo dentro del río para conservar poblaciones de peces que en general poseían un valor comercial (Lamb, 1995). Por lo tanto, debía estimarse un flujo mínimo que permitiera sus desplazamientos y completar sus ciclos de vidas con el fin de sostener su producción y comercialización. Centrados en estos organismos se desarrollaron muchas de las técnicas hasta ahora utilizadas para calcular esa cantidad de agua requerida dentro del cauce.

Actualmente, el término instream flow (reconociendo la importancia de otras magnitudes de flujo, no solo la mínima) se puede entender como un caudal específico a mantener dentro de un cauce para cumplir con determinados objetivos de conservación propuestos para el manejo de una cuenca o un río en particular.

En países latinos la traducción o interpretación de este término ha generado expresiones como caudal mínimo, caudal ecológico y caudal ambiental dependiendo de los objetivos de cada institución de gestión.

El caudal mínimo, técnicamente según hidrólogos, es aquel caudal que ocurre en periodos de sequías proveniente del afloramiento de aguas subterráneas (Silveira y Silveira, 2003). Por otra parte, el caudal ecológico se ha entendido como aquel volumen de agua que se mantiene en el cauce de un río para alcanzar ciertos objetivos de conservación ecológica, mientras que un caudal ambiental aseguraría el cumplimiento de las funciones ecológicas, sociales y económicas de los cursos de agua (García de Jalón y Gonzáles del Tánago, 2002; Pelissari y Sarmiento, 2003).

En general, como es el caso en Chile, Brasil y España, se define un caudal ecológico con el objetivo final de conservar ecosistemas, sin embargo, lo conceptualizan como un caudal mínimo

bajo las antiguas visiones de que un volumen mínimo, incluso constante, sería necesario para mantener poblaciones de peces específicos y suficiente para el desarrollo de los ecosistemas (DGA, 1999; García de Jalón y Gonzáles del Tánago, 2002; Pelissari y Sarmiento, 2003).

2.2. Métodos para la obtención del caudal ecológico

En este capítulo los métodos se agrupan de acuerdo a bases teóricas similares y acorde con lo descrito por la Comisión Mundial de Embalses (King et al., 1999). Una breve descripción de cada uno de ellos es mostrada a continuación, sin embargo, para una mejor comprensión de la evaluación de los mismos en el anexo 1 son entregados mayores detalles.

2.2.1. Métodos hidrológicos

En éstos métodos se considera que las comunidades han evolucionado en respuesta a un cierto tipo de régimen hidrológico, por lo tanto, los organismos de estas comunidades están adaptados a las variaciones estacionales propias de dicho régimen. Estas variaciones “naturales” afectan el comportamiento, ciclo biológico y producción de las poblaciones. Dentro de estos métodos se identificaron aquellos clasificados como hidrológicos simples, entre los que se encuentran el método de Curva de Permanencia, método de Tennat, método del caudal mínimo de siete días con periodo de ocurrencia de diez años (7Q10) y métodos europeos. Mientras que el Método de Aproximación por Rangos de Variabilidad (RVA) fue clasificado como otro tipo de método hidrológico por su complejidad y por estimarse con el uso del mismo caudales variables (a diferencia de los anteriores).

2.2.2. Métodos hidráulicos

Al idear estos métodos se considera que variables hidráulicas simples como el perímetro mojado o la profundidad máxima son factores limitantes en la sobrevivencia de la biota dentro del cauce. Uno de los métodos más usados ha sido el método de Perímetro Mojado que relaciona el caudal con el perímetro mojado del cauce.

2.2.3. Métodos de simulación de hábitat

Según este tipo de método se piensa que los peces están mejor adaptados a ciertas características hidráulicas y geomorfológicas de los cursos de agua, al conocer cómo afecta el caudal a estas características se puede predecir el caudal óptimo para mantener sus poblaciones. Dentro de este tipo el método IFIM ha sido el más comúnmente utilizado.

2.2.4. Métodos holísticos

En estos métodos se asume que algunas características del flujo natural son más importantes ecológicamente que otras (por ejemplo algunos flujos de base y de inundaciones) y si son identificadas las características esenciales del flujo hídrico que pueden generar un impacto ecológico y estas son incorporadas dentro de un régimen de flujo modificado, entonces la biota y la integridad funcional del ecosistema será mantenida (Bragg et al., 1999 y King y Louw, 1998). Estos tipos de métodos han sido elaborados en Sur África (ideando el método de “Building Block”) y en países como Australia y Nueva Zelanda (los cuales diseñan, por ejemplo, el método de “Benchmarking”).

2.3. Recopilación de manuales y normas DGA

2.3.1. Manual de normas y procedimientos para la administración de recursos hídricos

La primera publicación de la DGA con respecto a la determinación de caudales ecológicos es “Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos” (2002) y establece que el caudal ecológico puede ser determinado ya sea con metodologías que estiman un porcentaje del caudal natural del río o bajo métodos que buscan conocer los requerimientos de caudal específicos para cada “agente usuario” (entre estos agentes mencionan la flora y fauna acuática, la vida humana, etc.).

Este manual tuvo como objetivo disponer de las bases generales que permitieran “definir en forma clara y precisa los principales procedimientos respecto de la forma de efectuar las labores de Administración de Recursos Hídricos, que corresponden dentro de las atribuciones y funciones de la Dirección General de Aguas”.

Luego en 2005, se publica la ley 20.017 donde se instaura el concepto de caudal ecológico mínimo, el cual se define como el caudal mínimo para la preservación de la naturaleza y la protección del medio ambiente. Además se establece que este caudal no puede ser superior al 20% del caudal medio anual.

Finalmente a fines de 2013 se publica el decreto supremo N° 14 el cual define que el caudal ecológico mínimo para los nuevos derechos de aprovechamiento de aguas que se constituyan en cada fuente superficial, será equivalente al 20% del caudal medio mensual y agrega que este caudal no puede ser mayor al 40% del caudal medio mensual de la respectiva fuente superficial en el sector de interés.

El método utilizado para determinar este caudal es del tipo hidrológico simple, y se basa en la utilización de estadísticas hidrológicas de los últimos 25 años en el sector de interés.

En el ámbito de la fiscalización, la DGA establece que, en el marco de sus facultades legales, deberá fiscalizar el permanente cumplimiento de normas y condiciones sobre la base de la cual se aprobó el estudio o se aceptó la declaración de impacto ambiental de un proyecto o actividad, de acuerdo a lo establecido en el artículo 64 de la ley 19.300.

En tanto también corresponderá a la DGA, desarrollar un programa nacional de monitoreo, a través de las direcciones regionales de medición y control de caudal, para efectos de velar por el cumplimiento de la normativa, en este caso particular, por parte de mini centrales hidroeléctricas.

DS N°14 (Extracto)

a. El caudal equivalente al veinte por ciento del caudal medio mensual de la respectiva fuente superficial con el límite máximo del veinte por ciento del caudal medio anual establecido en el artículo 129 bis 1 del Código de Aguas.

b. La utilización de estadísticas hidrológicas de los últimos 25 años.

c. En el caso de que para una fuente determinada no exista esta estadística, la Dirección General de Aguas la generará utilizando el método hidrológico más adecuado al caso concreto, de

aquellos conocidos y aceptados por la técnica, lo que deberá quedar claramente fundado en el informe técnico de que trata el artículo 5°.

El contenido completo del decreto, se encuentra en el anexo E

2.4. Entrevista a DGA

Para conocer presencialmente la determinación del caudal ecológico por parte de la DGA, se realizó una entrevista presencial al profesional a cargo de otorgar este caudal a proyectos de mini centrales actuales.

En esta oportunidad la profesional se trata de Aracely Ulloa Sánchez, quien es una de las responsables de otorgar recursos hídricos.

La entrevista completa se puede encontrar en Anexo C.

2.5. Alternativas de vertedores de caudal variable

En este capítulo se describirán las alternativas propuestas para el paso del caudal ecológico bajo la condición de variabilidad mensual. Cada opción que se plantea fue diseñada por el autor para satisfacer esta condición, teniendo en cuenta criterios de selección adaptables para proyectos de mini centrales hidroeléctricas.

2.5.1. Alternativa 1: Compuerta vertical con orificios de distinto diámetro

2.5.1.1. Compuerta vertical

Se denomina “compuerta” a una hoja, generalmente metálica, que permite regular la abertura de pasada del agua y que permite controlar el caudal en un canal abierto. La compuerta no posee una carcasa cerrada y la hoja normalmente está a la vista. En la mayoría de los casos, la compuerta puede observarse en detalle y apreciar su movimiento a simple vista. La mayoría de las compuertas se ubican en canalizaciones abiertas, pero también pueden situarse en las salidas de túneles en presión. (Horacio Mary, 2013)

La ventaja de la compuerta plana vertical es que requiere de muros laterales o machones relativamente cortos. Las desventajas de estas compuertas son:

- Necesitan ranuras para situar a la compuerta.
- Es posible que las ranuras se atoren con piedras o sedimentos.
- Es problemático el vertimiento sobre la compuerta.
- Si la compuerta tiene rodillos o ruedas para deslizarse, ellas giran bajo agua.

La mayoría de las compuertas planas verticales están contrapesadas para reducir el esfuerzo de izamiento. A fin de evitar que el contrapeso entre en el agua cuando la compuerta se levanta, el movimiento del contrapeso se diseña de modo que éste se desplaza la mitad de la distancia. En este caso resulta una carga adicional del orden de 2,7 veces la masa adicional de la compuerta y requiere un soporte estructural sustancial con un aumento del costo de la instalación.

Muchas compuertas de este tipo, tienen rodillos o ruedas fijas. Estas ruedas son espaciadas de manera que tomen iguales cargas debido a las fuerzas hidrostáticas. El alineamiento de los rodillos es crítico, ya que un contacto irregular de uno de ellos puede recargar a los rodillos adyacentes.

Con respecto a los sellos es preferible que se ubiquen por el lado de aguas abajo de la compuerta debido a que a la fuerza hidrostática ejercida por el agua, presiona al sello contra la placa. Sellar por aguas arriba se requiere cuando por ejemplo la compuerta se ubica en un pique, en el lado de aguas arriba y la inspección de la compuerta o del túnel debe efectuarse por el pique.

2.5.1.2. Solución adaptable a lo Requerido

Debido a que se tiene que entregar diferentes caudales ecológicos a lo largo del año, una posible medida es crear una compuerta vertical a un costado del azud, con orificios de diferente diámetro en el plano vertical, permitiendo la variabilidad de caudal ecológico necesaria. Estos diámetros serán definidos según el caudal ecológico a entregar por parte de la DGA, con esta medida se puede asegurar una variabilidad adecuada.

2.5.1.3. Criterios de selección

La presente alternativa cuenta con los siguientes criterios para su posible elección:

- **Adaptación:** La compuerta a construir, es adaptable a cualquier tipo de proyecto en donde se cuenta con un azud, ya que se instala a un costado de este.
- **Constructibilidad:** Debido a su material metálico, es fácil poder perforar la placa para los orificios, además de su facilidad para transportar e instalar en terreno.
- **Operación:** Esta compuerta cuenta con un eje móvil a través de un vástago en su extremo superior, el cual fácilmente puede ser accionado en su operación.
- **Mantención:** Ya que el material presenta buena respuesta al ambiente y al agua en particular, no es necesaria una mantención constante. Solo debe tener un cierto cuidado con la acumulación de material particulado que pudiera ingresar a los orificios, para esto debe destaparse de inmediato.

2.5.1.4. Memoria de cálculo

Orificios de pared delgada

Suponiendo un plano de referencia que coincida con el centro de gravedad del orificio, además de considerar despreciable la velocidad de llegada al orificio y el desnivel entre el centro de gravedad del orificio y la sección contraída. La ecuación general queda de la siguiente forma:

$$Q = C_d A \sqrt{2gH}$$

Dónde:

Q: Caudal a la salida del orificio. (m³/s)

C_d: Coeficiente de gasto, al considerar una corrección en la velocidad y una reducción del área debido a una contracción.

A: área del orificio. (m²)

H: desnivel entre la superficie libre del agua y el centro de gravedad del orificio. (m)

En el caso de una contracción completa a la salida del orificio, el coeficiente de gasto C_d, converge a 0.6 (Gilberto Sotelo, 1997)

Luego, teniendo el caudal a entregar, podemos calcular el diámetro del orificio que se tendrá que perforar en la placa de la compuerta vertical.

A modo de ejemplo, se determinara los distintos diámetros a utilizar en los orificios para cada solución planteada. La tabla N° 2 muestra distintos caudales ecológicos otorgados para un proyecto realizado en el estero Quillaileo.

Tabla 2: caudal ecológico en litros por segundo para el estero Quillaileo

Mes	Caudal ecológico (l/s)
Enero	29.5
Febrero	22.7
Marzo	18.3
Abril	47.7
Mayo	194.1
Junio	194.1
Julio	194.1
Agosto	194.1
Septiembre	194.1
Octubre	179.6
Noviembre	109.5
diciembre	60.6

A modo de ejemplo, se utilizaran para este cálculo los 4 caudales más representativos, estos son: 194.1, 109.5, 60.6, 18.3 (l/s)

Para Alternativa N° 1:

Se tiene que:

$$Q = C_d A \sqrt{2gH}$$

Pero sabemos que el coeficiente de gasto, converge a 0.6 para este tipo de orificios según la literatura. Además consideramos $H=1.5$ m para todos los casos, ya que se considera una profundidad común en este tipo de proyectos.

$$Q = 0.6A\sqrt{2gH}$$

Reemplazando los caudales elegidos:

$$194.1 \times 10^{-3} = 0.6A\sqrt{2 \times 9.81 \times 1.5} \quad (1)$$

$$109.5 \times 10^{-3} = 0.6A\sqrt{2 \times 9.81 \times 1.5} \quad (2)$$

$$60.6 \times 10^{-3} = 0.6A\sqrt{2 \times 9.81 \times 1.5} \quad (3)$$

$$18.3 \times 10^{-3} = 0.6A\sqrt{2 \times 9.81 \times 1.5} \quad (4)$$

Conociendo el valor del área, podemos despejar el diámetro necesario para nuestro orificio:

$$A = \pi \frac{d^2}{4}$$

$$d = 275 \text{ mm} \quad (1)$$

$$d = 200 \text{ mm} \quad (2)$$

$$d = 150 \text{ mm} \quad (3)$$

$$d = 80 \text{ mm} \quad (4)$$

Estas serán las dimensiones de los orificios que se deberán perforar en la placa de la compuerta. Cabe mencionar que se pueden hacer más perforaciones para así entregar los caudales correspondientes a cada mes.

2.5.2. Alternativa 2: Compuerta radial, con abertura en su base

2.5.2.1. Compuerta radial

Estas compuertas se utilizan mucho en los canales abiertos, en las barreras móviles de bocatomas, en los vertederos de las presas, etc. La forma de la hoja es un manto de cilindro de eje horizontal. Son compuertas simples y confiables y menos costosas que otros tipos de compuertas. Sus ventajas son:

- Ausencia de ranuras laterales, muy beneficioso desde el punto de vista hidráulico y estructural.
- Los esfuerzos debido a las presiones producidas por el agua se transmiten a los dos apoyos a través de los brazos.
- Se requiere una menor capacidad de izamiento en relación con las compuertas planas verticales.
- Las compuertas radiales son mecánicamente más simples y los equipos para operarlas son menos costosos.
- Los apoyos pueden ubicarse de modo que queden protegidos de los cuerpos flotantes. Simplifica el problema de la corrosión y permite algún grado de inspección aún con la compuerta en operación.
- La superestructura requerida para izar a la compuerta radial es generalmente más baja y generalmente no requiere más allá de un puente de maniobra.
- La compuerta tiene los refuerzos estructurales suficientes y en general mejor apariencia.
- No existe posibilidad que se atrapen cuerpos flotantes en las ruedas laterales de la compuerta.

Las principales desventajas de la compuerta radial, son:

- Requieren muros relativamente largos y altos hacia aguas abajo para absorber los esfuerzos puntuales entregados por los brazos a los apoyos de la compuerta.
- Las fuerzas sobre la compuerta es tomada por los machones, los que reciben una carga concentrada en los apoyos de los brazos de la compuerta radial. La forma como se distribuye la carga sobre el muro o machón requiere de consideraciones especiales. En compuertas que tienen una superficie superior a 150 (m²), generalmente se utilizan barras

de acero pretensadas y anclajes de hormigón, debido a las grandes cargas concentradas en los apoyos en los machones.

- Tiene una mayor complejidad de fabricación.

2.5.2.2. Solución adaptable a lo requerido

Con el fin de entregar un caudal variable, se propone diseñar un mecanismo especial en la zona de contacto entre la presa y la compuerta de segmento de tal forma que se pueda ajustar una abertura para dejar escurrir el caudal ecológico. Dicho mecanismo consistirá en un tacón de apoyo en ambos extremos de la compuerta, de modo que exista la distancia necesaria entre la presa y el segmento metálico para entregar el caudal ecológico mínimo a entregar. Sobre estos tacones se agregaran hilos metálicos con pernos en su extremo que están en contacto con la compuerta radial. Al girar el perno en su eje, este levantará la estructura metálica aumentando el área que se genera entre ambos cuerpos rígidos, de esta forma se podrá entregar caudales mayores.

2.5.2.3. Criterios de selección

La presente alternativa cuenta con los siguientes criterios para su posible elección:

- **Simplicidad:** Esta alternativa es simple de construir, ya que las piezas a utilizar son muy comunes en construcción.
- **Apariencia:** En general este tipo de compuertas presentan una mayor aceptación visual.
- **Operación:** En comparación a una compuerta vertical, la compuerta radial requiere menor esfuerzo de izamiento.

2.5.2.4. Memoria de cálculo

Descarga de una compuerta Radial

Esta compuerta se designa como compuerta de sector o de segmento. Su superficie esta constituida por un manto cilíndrico y debido a la curvatura propia de la superficie, el coeficiente de contracción es mayor que el de la compuerta plana vertical. Los parámetros característicos del escurrimiento cuando la compuerta funciona libremente son (ver figura 2):

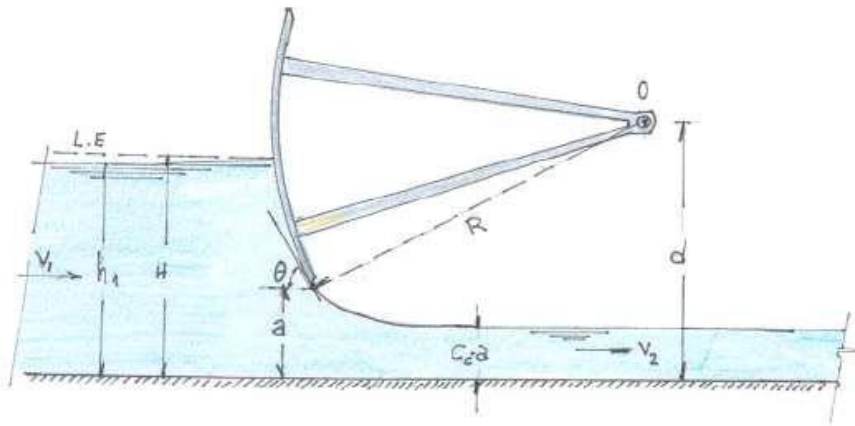


Figura 2: Ecurrimiento de una compuerta radial

Fuente: Horacio Mary, 2013

h: altura de aguas arriba de la compuerta. (m)

a: abertura de la compuerta. (m)

r: radio del manto cilíndrico. (m)

d: altura de los apoyos de la compuerta (m)

θ : ángulo formado por la tangente al manto en el labio con la horizontal. (π)

Para estimaciones preliminares puede usarse la expresión dada por Henderson (Open Channel Flow), basada en las experiencias de von Mises y de Toch:

$$C_c = 1 - 0.75 \times \theta + 0.36 \times \theta^2$$

El ángulo “ θ ” se expresa como múltiplo de 90° . Para valores de $\theta < 1$ la relación da el coeficiente de contracción con una aproximación de $\pm 5\%$.

El caudal descargado por la compuerta según las notaciones de la figura 7 se obtiene suponiendo la conservación de la energía (constancia del Bernoulli) y conservación de la masa (ecuación de continuidad), finalmente el caudal unitario queda determinado por la siguiente relación:

$$q = C_q \times a \times \sqrt{2gh}$$

$$C_q = \frac{C_c}{\sqrt{1 + C_c \times \frac{a}{h}}}$$

De esta forma, despejando el caudal ecológico a entregar, obtenemos la abertura necesaria entre la compuerta y la presa de descarga.

De la misma forma que la alternativa anterior, se determinara la sección de abertura para los 4 caudales más representativos de la tabla n° 6. 194.1 (l/s), 109.5 (l/s), 60.6 (l/s), 18.3 (l/s)

Se tiene que:

$$C_c = 1 - 0.75 \times \theta + 0.36 \times \theta^2$$

$$q = C_q \times a \times \sqrt{2gh}$$

$$C_q = \frac{C_c}{\sqrt{1 + C_c \times \frac{a}{h}}}$$

Suponiendo $\theta = 45^\circ$, ángulo típico en este tipo de compuertas, y un nivel de $h = 1\text{m}$. Aguas arriba de la compuerta, podemos despejar la abertura mínima, correspondiente al caudal ecológico mínimo.

$$C_c = 0.215$$

$$18.3 \times 10^{-3} = \frac{0.215}{\sqrt{1 + 0.215 \times a}} \times a \times \sqrt{2g}$$

$$a = 0.0192\text{m.} \approx 2\text{cm.}$$

Luego se deberá calcular el largo del hilo metálico que aumentara la abertura entre la placa y la presa. Para esto, se despeja a en función del caudal ecológico máximo.

$$194.1 \times 10^{-3} = \frac{0.215}{\sqrt{1 + 0.215 \times a}} \times a \times \sqrt{2g}$$

$$a = 0.208\text{m.} \approx 21\text{cm.}$$

2.5.3. Alternativa 3: Orificio al pie de canal de derivación con un tapón con agujero de diámetro variable

2.5.3.1. Funcionamiento

Luego de captar el flujo en la obra de toma, y conducirlo a través de un canal de sección rectangular, el caudal de diseño es llevado hacia un desarenador para luego pasar a la cámara de carga.

En este proceso, perforando lateralmente el desarenador, con un orificio de diámetro correspondiente al mayor caudal ecológico, se podrá entregar la cantidad caudal exigido por la DGA.

Para crear una variabilidad en la entrega, se adaptaran distintos tapones con diámetros correspondientes a los distintos caudales ecológicos a lo largo del año, los cuales serán introducidos en el orificio del desarenador según corresponda.

El material de este tapón será de goma, ya que presenta buenas características en presencia de agua.

2.5.3.2. Criterios de selección

La presente alternativa cuenta con los siguientes criterios para su posible elección:

- **Costos:** Esta alternativa solo requiere el costo de los distintos tapones, y ya que este es de goma, resulta ser la solución menos costosa.
- **Simplicidad:** Una característica destacada de esta solución, es que solo requiere un orificio al momento de montar el moldaje del canal conductor, y adaptar los tapones a los diámetros correspondientes.
- **Durabilidad:** Debido a que el material del tapón presenta buena respuesta al ambiente en donde se inserta, esta opción ofrece una alta durabilidad en el tiempo.

2.5.3.3. Memoria de calculo

Orificios de pared gruesa

En este tipo de orificios se observa que el chorro, una vez que ha pasado la sección contraída, tiene todavía espacio dentro del tubo para expandirse y llenar la totalidad de la sección. Entre la

sección contraída y la final ocurre un rápido descenso de la velocidad acompañado de turbulencia y fuerte pérdida de energía.

Por un razonamiento análogo al de los orificios de pared delgada, se concluye que el caudal de salida del líquido es:

$$Q = C_d A \sqrt{2gH}$$

Dónde:

Q: caudal a la salida del orificio. (m³/s)

C_d: Coeficiente de gasto, al considerar una corrección en la velocidad y una reducción del área debido a una contracción.

A: área del orificio. (m)

H: desnivel entre la superficie libre del agua y el centro de gravedad del orificio. (m)

En el caso de una contracción completa a la salida del orificio, el coeficiente de gasto C_d, converge a 0.82 (Gilberto Sotelo, 1997)

De la misma forma, se determinara la sección de abertura para los 4 caudales más representativos de la tabla n° 6. 194.1 (l/s), 109.5 (l/s), 60.6 (l/s), 18.3 (l/s)

Se tiene que:

$$Q = C_d A \sqrt{2gH}$$

Pero sabemos que el coeficiente de gasto, converge a 0.82 para este tipo de orificios según la literatura. Además consideramos H=1.5 m para todos los casos, ya que se considera una profundidad común en este tipo de proyectos.

$$Q = 0.82A\sqrt{2gH}$$

Reemplazando los caudales elegidos:

$$194.1 = 0.82A\sqrt{2xgx1.5} \quad (1)$$

$$109.5 = 0.82A\sqrt{2xgx1.5} \quad (2)$$

$$60.6 = 0.82A\sqrt{2xgx1.5} \quad (3)$$

$$18.3 = 0.82A\sqrt{2xgx1.5} \quad (4)$$

Conociendo el valor del área, podemos despejar el diámetro necesario para nuestro orificio:

$$A = \pi \frac{d^2}{4}$$

$$d = 235 \text{ mm} \quad (1)$$

$$d = 175 \text{ mm} \quad (2)$$

$$d = 130 \text{ mm} \quad (3)$$

$$d = 75 \text{ mm} \quad (4)$$

2.5.4. Alternativa 4: Válvula de compuerta reguladora de flujo

2.5.4.1. Válvula compuerta.

La válvula está constituida por un disco que se desliza perpendicularmente al eje de la tubería, por guías laterales insertas en el cuerpo de la válvula. En la posición de plena abertura de la válvula, el disco se ubica en el interior de la carcasa de la válvula, que es una caja estanca ubicada en la parte superior. El movimiento del disco se efectúa mediante un tornillo sin fin con una tuerca, la que al girar sube o baja el disco. Generalmente se utiliza un volante solidario a la tuerca en las válvulas operadas manualmente. En las válvulas motorizadas, una caja de reducción mediante engranajes efectúa el giro de la tuerca y así se puede subir o bajar el disco a la posición deseada. Hay válvulas con el vástago o tornillo sin fin solidario con el volante y el disco es doble con la tuerca en su extremo superior, de modo que con el giro del tornillo sin fin, el disco sube o baja según el sentido del giro.

Las válvulas de accionamiento manual no pueden usarse en tuberías mayores de $D = 400$ (mm) y con presiones superiores a 7 (kgp/cm²) o $0,7$ (Mpa). Las válvulas de diámetros mayores o bien sometidas a mayores presiones, deben accionarse mediante un motor eléctrico o un servomecanismo. En operación normal, una válvula intermedia que está cerrada, debe igualar presiones en ambos lados del disco antes de abrirla, para lo cual dispone de una tubería by-pass de pequeño diámetro que permite llenar el conducto de aguas abajo y así igualar las presiones en ambos lados del disco de cierre. En operaciones normales una válvula compuerta se abre o se cierra con escurrimiento nulo en la tubería, de esta manera el disco puede bajar o subir sin esfuerzos producidos por las fuerzas hidrodinámicas. Naturalmente en operaciones de emergencia, la válvula debe poder cerrar o abrir contra escurrimiento. Durante estas operaciones se desarrollan los mayores esfuerzos hidrodinámicos sobre el disco y el mecanismo de cierre.

Estas válvulas son de uso habitual en los sistemas de distribución de agua. Tienen la ventaja de ser válvulas económicas, robustas y presentan una pequeña pérdida de carga cuando están completamente abiertas.

2.5.4.2. Criterios de selección

- **Bajo costo:** Este tipo de válvula es muy universal, por lo que no es costoso adquirirla para poder implementar esta alternativa.

- **Operación:** Para poder operar la válvula, basta con girar el vástago a través de un volante giratorio manual, y así disminuir o aumentar el diámetro de salida.

2.5.4.3. Memoria de calculo

Denominamos coeficiente de contracción “Cc”, a la relación entre el valor del área efectiva del chorro que escurre bajo el disco de la válvula A_o y el área de la tubería A . Los valores del coeficiente de contracción, según el USBR, para una válvula de disco circular se indican en la Tabla 3, en función de la relación a/D , siendo “a” la abertura de la válvula y “D” el diámetro de la tubería.

Tabla 3: Coeficientes de contracción de la válvula compuerta con disco de sección circular.

a/D	Cc	Kv	a/D	Cc	Kv
0,1	0,10	81,00	0,6	0,57	0,57
0,2	0,19	18,17	0,7	0,66	0,265
0,3	0,28	6,61	0,8	0,755	0,105
0,4	0,375	2,78	0,9	0,85	0,031
0,5	0,475	1,22	1,0	0,95	0,003

- La figura 3 muestra una válvula en un punto intermedio de la tubería.

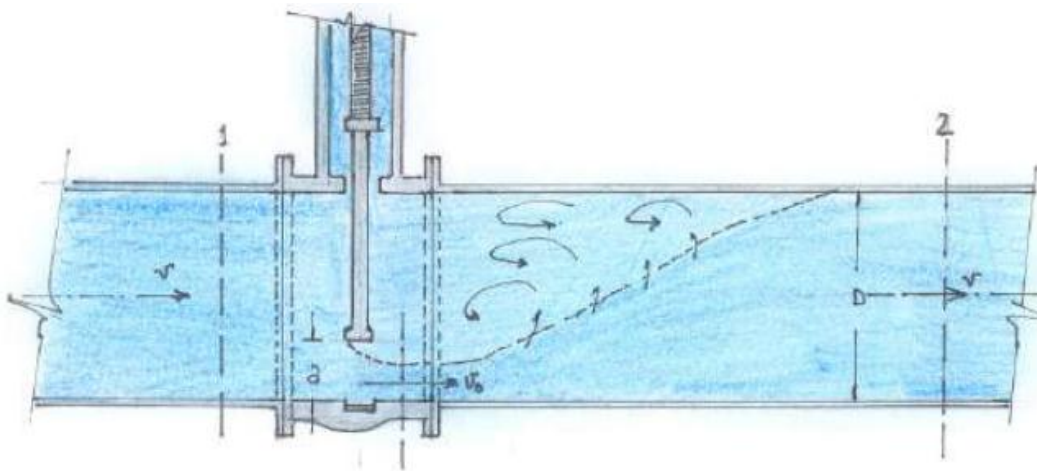


Figura 3: Válvula compuerta operando con una abertura “a”

Fuente: Horacio Mary, 2013

Luego de un análisis y transformaciones algebraicas, el caudal total a la salida de la válvula, queda de la siguiente forma:

$$Q = A \times \frac{1}{\sqrt{K_v}} \times \sqrt{2gH}$$

Q: caudal a la salida de la válvula. (m³/s)

K_v : corresponde al coeficiente de gasto de la válvula “ C_q ”

A: área del orificio. (m)

H: desnivel entre la superficie libre del agua y el centro de gravedad del orificio. (m)

De la misma forma, se determinara la sección de abertura para los 4 caudales más representativos de la tabla n° 6. 194.1 (l/s), 109.5 (l/s), 60.6 (l/s), 18.3 (l/s)

En este caso, solo debemos calcular el máximo diámetro de la válvula, ya que para los demás se debe cerrar paulatinamente la abertura.

Se tiene que:

$$Q = A \times \frac{1}{\sqrt{K_v}} \times \sqrt{2gH}$$

Debemos encontrar el valor de K_v para la máxima abertura de la válvula, esto es, $a/D = 1$, además $H = 1.5$ m.

Reemplazando el caudal máximo,

$$194.1 \times 10^{-3} = A \times \frac{1}{\sqrt{0.003}} \times \sqrt{2g \times 1.5}$$

Conociendo el valor del área, podemos despejar el diámetro adecuado para la válvula:

$$A = \pi \frac{d^2}{4}$$

$$d = 50 \text{ mm.}$$

3. ANALISIS DE RESULTADOS

3.1. Variabilidad de caudal ecológico en ríos

Como se observó en la primera parte, los distintos niveles de caudales con una cierta frecuencia o duración juegan un rol importante en la conservación de los ecosistemas loticos. Esto también es debido a que los flujos de agua mantienen relaciones intersistemicas, es decir, el intercambio de materia y energía entre el sistema acuático y el terrestre.

En la tabla 4 se puede apreciar las diferentes funciones que tiene cada caudal a lo largo de un año, pasando de estados de sequias a estados de inundación.

Tabla 4. Funciones ecológicas de diferentes niveles de caudal

Niveles de caudales	funciones ecológicas
Flujos bajos (de base)	<p>Niveles Normales:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mantener la temperatura del agua y oxígeno disuelto • Capacitar a los peces de moverse hacia área favorables para su alimentación y de desove • Proveer el espacio de hábitat adecuado para organismos acuáticos • Mantener en suspensión los huevos de peces y anfibios • Mantener el acuífero en zonas inundables <p>Niveles de sequía:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mantener especies vegetales en las áreas inundables • Evitar la invasión de especies introducidas en las comunidades riparianas y acuáticas
Flujos altos	<ul style="list-style-type: none"> • Restituir la calidad de agua después de prolongados flujos bajos o de la emisión de contaminantes • Prevenir que la vegetación ripariana invada los cauces • Moldear las características físicas de los cauces

Flujos de inundación

- Depositar nutrientes en el área inundable
- Depositar gravas y grandes sedimentos en áreas de desove
- Acarrear materia orgánica dentro del cauce
- Mantener la biodiversidad vegetal en la zona inundable
- Mantener el balance de especies en las comunidades acuáticas y ripariana
- Capacita a los peces a desovar en áreas inundables
- Moldea el hábitat físico de las áreas inundables
- Dispersa semillas y frutas de las plantas riparianas
- Recarga el acuífero de la zona inundable

3.2. Métodos de obtención de caudal ecológico

3.2.1. Evaluación de los métodos para la obtención del caudal ecológico

La tabla 5 muestra la comparación entre los distintos tipos de métodos existentes en relación a aspectos ecológicos y a aspectos de gestión según lo investigado por King y colaboradores (1999). Como se observa más claramente en la tabla, muchos de los métodos determinan un caudal mínimo siendo este mismo pensado para conservar poblaciones de peces. Tan solo el método RVA y los de tipo holístico toman en cuenta directa o indirectamente la importancia del caudal en mantener interacciones intersistémicas, esto con el propósito final de conservar los ecosistemas acuáticos.

Por otra parte, en términos de gestión (tabla 6), se considera de baja flexibilidad a métodos que no pueden ser aplicados en la mayoría de los ecosistemas acuáticos, como por ejemplo, los métodos hidráulicos que consideran ríos con cauces estables y secciones rectangulares, siendo que poco ríos presentan estas características. En tanto, los métodos denominados como de flexibilidad “alta con precaución” son aquellos que pueden ser aplicados en una vasta variedad de ecosistemas lóticos pero con el cuidado de no adoptar los valores que se determinan en ríos diferentes; solo serían generalizables sus procedimientos. Los costos que se presentan en la tabla son relativos a los costos de los métodos con que se comparan y el grado de complejidad de los

mimos se determinó de acuerdo al tiempo requerido, el grado de conocimientos y la necesidad de personal calificado o número de especialistas para llevar a cabo la determinación del caudal ecológico.

Tabla 5. Comparación de métodos para determinar un caudal ecológico en relación a aspectos ecológicos

Tipo	Elementos del flujo hídrico	Objetivo de conservación	Relaciones estudiadas
Hidrológicos			
a) Simples	Magnitud	En general, mantener poblaciones de peces (depredadores tope)	Caudal-biota acuática
b) RVA	Magnitud predictibilidad, duración, frecuencia y tasa de cambio	ecosistema	Caudal, interacciones intersistémicas
Hidráulicos	Magnitud	En general, mantener poblaciones de peces	Caudal, características hidráulicas
De simulación de hábitat	Magnitud	En general mantener poblaciones de peces	Caudal, características hidráulicas y geomorfológicas
Holísticos	Magnitud duración y predictibilidad	Ecosistemas, valores económicos y culturales	Caudal, características geomorfológicas, interacciones intersistémicas, calidad de las aguas

Tabla 6. Comparación de métodos para determinar un caudal ecológico en relación a aspectos de gestión

Tipo	Flexibilidad	Complejidad	Costo
Hidrológicos			
c) Simples	Baja	Baja	Bajos
d) RVA	Alta con precaución	Baja a media	Medios
Hidráulicos	Baja	Baja a media	Bajos a medios
De simulación de hábitat	Baja	Media a alta	Altos
Holísticos	Alta con precaución	Media a alta	Medios a altos

3.2.2. Comentarios

Estos métodos son evaluados positivamente ya que explícitamente definen un flujo variable para mantener los ecosistemas estimando un caudal en términos de magnitud, duración, y predictibilidad para mantener no solo la biota acuática, sino también la vegetación ripariana y en general las distintas relaciones con las zonas de inundación.

Gran parte de las metodologías descritas en este capítulo han sido diseñadas en Estados Unidos por lo que se considera un país líder en cuanto a cálculo de caudales ecológicos. En cuanto a los métodos que son empleados para determinar un caudal ecológico en Chile, la DGA recomienda fijarlo a través de métodos de tipo hidrológicos simples. Explícitamente declara que el caudal ecológico puede estimarse como el 20% del caudal medio mensual, siendo este criterio el que rige en todos los nuevos proyectos de mini centrales hidroeléctricas desde la publicación del Decreto Supremo N°14 (2013)

3.3. Normas técnicas y legales de la DGA con respecto a caudales ecológicos en mini centrales hidroeléctricas

En las investigaciones realizadas por la DGA se define el caudal ecológico como un caudal mínimo de agua, y no se especifica la importancia de mantener el flujo de entrada de energía al sistema a través de la mantención de flujos intersistémicos.

Como se explicitó en revisión bibliográfica sobre la conservación a nivel de ecosistemas, es difícil que a través del entendimiento del comportamiento de un solo componente (en este caso los organismos, específicamente poblaciones de peces o bien la columna de agua) pueda predecirse la conservación de la estructura y funcionamiento de todo el ecosistema.

A pesar de los estudios realizados o encomendados por la DGA y las últimas tentativas de potenciar el uso de métodos de simulación de hábitat, la DGA declara que el criterio más frecuentemente utilizado para cuantificar un caudal ecológico en proyectos de mini centrales hidroeléctricas es determinar el 20% del caudal medio mensual del tramo del cauce del cual se piden nuevos derechos. Pareciera entonces que se toman en cuenta las recomendaciones dadas por Tennant. Sin embargo, las recomendaciones del método de Tennant fueron pensadas para mantener el hábitat de peces (no la mantención del ecosistema) y bajo condiciones hidrológicas y geográficas particulares del norte y centro de Estados Unidos. Mientras, al menos un estudio muestra que existen diferencias importantes entre los ecosistemas lóticos de cabecera de bosques

templados del hemisferio Norte con los ecosistemas lóticos centrales de Chile, debido principalmente a las altas pendientes de los ríos que estos últimos presentan.

3.4. Análisis de entrevista a DGA

En dicha entrevista se menciona que existe un único criterio para otorgar el caudal ecológico, el cual lo establece el DS N°14 como un 20% del caudal medio mensual. Además se rectifica que la estadística hidrológica para estimar este caudal corresponde a los últimos 25 años en el punto donde se va a otorgar este derecho.

Además se puede observar que no existe una estandarización y menos conocimiento de obras hidráulicas que satisfagan esta variabilidad del caudal ecológico por parte de la DGA, por lo que es importante entregar alternativas que cumpla las condiciones establecidas para que se propongan en futuros proyectos de mini centrales.

Por último, en el marco legal, la DGA puede iniciar un proceso de fiscalización donde puede demandar al peticionario del derecho si este no entrega el caudal ecológico otorgado ya que estaría infringiendo el código de aguas. Esto está asociado a multas que puede cursar la DGA o puede seguir el camino judicial cuando no hay cambios luego de una amonestación, donde será un juez el que decide el camino a seguir.

Dicho esto, es relevante que el caudal ecológico se entregue de forma variable y se controle inmediatamente después de la obra de toma, en futuros proyectos de mini centrales hidroeléctricas.

3.5. Alternativas de vertedores de caudal ecológico

Para efecto de variabilidad de caudal ecológico, todas las alternativas propuestas en este estudio, presentan la característica de entregar el caudal ecológico requerido para cada mes del año y así cumplir con la normativa indicada por la DGA. Sin embargo, existen múltiples factores propios de cada proyecto de mini central para determinar que alternativa se comporta mejor que otra. Factores tales como, topografía del lugar, acceso, crecidas del río, personal de operación, serán los que finalmente decidirán la solución óptima en cada proyecto.

En la tabla 7 se comparan en base a diferentes criterios las distintas alternativas de vertedores mencionadas en el capítulo anterior.

Tabla 7. Comparación de criterios de distintas alternativas de obras hidráulicas de caudal variable

Alternativa	Criterios			
	Costo	Operación	Mantenimiento	Adaptación
Compuerta vertical	Medio	Fácil	Baja	Alta
Compuerta radial	Alto	Medio	Baja	Baja
Desarenador con orificio	Bajo	Medio	Baja	Alta
Válvula de compuerta	Bajo	Fácil	Media	Media

Según los criterios expuestos en el cuadro anterior, la alternativa que presenta mejores características es la compuerta vertical con orificios de diferente diámetro, ya que se adopta a cualquier proyecto de mini central que posea un azud con toma lateral, además de su bajo costo de implementación y de mantenimiento.

Con respecto a la operación, todas las alternativas requieren un personal técnico que manualmente ajusten los orificios correspondientes a cada caudal ecológico exigido por la DGA mensualmente. La alternativa que destaca en su simplicidad de operación es la válvula de compuerta, la cual solo requiere un giro en su eje volante para ajustar su diámetro interior.

Obviamente, si el proyecto de mini central, contempla la construcción de una compuerta radial, la alternativa propuesta con la abertura en su base en el capítulo anterior, será la más indicada para entregar un caudal variable adaptándose de mejor forma a la compuerta.

4. DISCUSIÓN

4.1. Control de operación

Todas las alternativas propuestas en este estudio, son de operación manual bajo un determinado personal técnico encargado tanto de su mantención como de su correcto funcionamiento, esto es, entregar la variabilidad necesaria para satisfacer los requerimientos impuestos por la DGA para cada Proyecto de mini central hidroeléctrica. Sin embargo, este proceso se puede automatizar a través de dispositivos electrónicos configurados de tal forma que puedan activar el mecanismo de cada alternativa de vertedor por sí misma evitando así la manipulación por parte del portador del derecho del recurso hídrico.

En contraparte a esto, el costo de automatizar estos dispositivos encarecería el proyecto de una mini central, y como la normativa no obliga al mandante ejecutar esta opción, definitivamente no se realizaría. Además, estos dispositivos electrónicos expuestos en un ambiente natural, eventualmente podrían presentar fallas, las que desencadenarían en una incorrecta entrega de caudal ecológico.

4.2. Sección fija v/s sección variable

Si bien es cierto, optar por una sección fija es quizás la alternativa más simple del punto de vista de operación y mantenimiento, no lo es del lado de la variabilidad de flujo y por lo tanto el cumplimiento del decreto supremo N° 14 (2013).

Como se mencionó en el segundo capítulo, para preservar el ecosistema ante una alteración de la condición natural del flujo de un cauce o río, se requiere entregar una variabilidad de caudal a lo largo del año, desde caudales ecológicos de estiaje a caudales ecológicos mayores durante los determinados meses. Dicho esto es que las obras hidráulicas de sección variable toman ventaja sobre las de sección fija, que solo están capacitadas para entregar un determinado caudal durante todo el año.

Por otro lado, las obras hidráulicas de sección fija aseguran un caudal constante sin un operación manual, lo cual presenta una ventaja en comparación a obras hidráulicas de sección variables, que su variabilidad de flujo depende del operador que accione el mecanismo. Es por esto que en algunos proyectos se opta por construir obras que entreguen el máximo caudal ecológico otorgado por la DGA.

Del punto de vista del mantenimiento, ambas opciones requieren una constante limpieza de la sección seleccionada, ya que partículas en suspensión podrían imposibilitar el paso de caudal a través del conducto elegido.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo se exhiben las respuestas a los objetivos planteados inicialmente y además, se plantean recomendaciones conforme a la información obtenida durante la investigación.

A través de la revisión bibliográfica, se pudo determinar la importancia del caudal ecológico en ríos donde se instalan proyectos de mini centrales hidroeléctricas y además su entrega variable a lo largo del año, ya que organismos que componen el ecosistema existente necesita replicar las condiciones naturales para poder perdurar en el tiempo luego de una alteración en su hábitat.

Por otra parte, existen diversos métodos para la obtención de caudal ecológico que pueden ser aplicados en proyectos de mini centrales, algunos con el afán de preservar especies determinadas, y otros preservar el ecosistema en su conjunto. Sin embargo, todos los métodos mencionados en este estudio, sugieren una variabilidad de caudal ecológico, en contraparte de fijar un solo valor para todo el año.

Con respecto a la normativa impuesta por la DGA en proyectos de mini centrales, es importante que exista el conocimiento de la necesidad de un caudal ecológico y sea expuesta en un decreto supremo. Si bien es cierto, el método para la obtención de este caudal no es el más indicado para preservar la naturaleza y proteger el medio ambiente como lo indica el reglamento, contar con una variabilidad mensual en su entrega es sinónimo de avanzar hacia buen puerto.

También se pudo observar una falta de fiscalización y monitoreo por parte de la DGA en materia de caudales ecológicos en mini centrales, lo que da a lugar a una manipulación de caudales por parte de portador del derecho.

Por último, las alternativas propuestas en este estudio fueron diseñadas para cumplir con la variabilidad exigida en proyecto de mini centrales hidroeléctricas. La efectividad y adaptación de

cada una dependerá netamente de cada proyecto en particular, resultando así, una más óptima que las otras.

Como recomendación, esta investigación propone realizar un plan de monitoreo y fiscalización adecuada sobre proyectos de mini centrales, y particularmente en la entrega de caudal ecológico, ya que se observa una falta de verificación en terreno del cumplimiento de la normativa impuesta, con el objetivo de asegurar la correcta variabilidad de este caudal a lo largo del año.

Finalmente, el propósito de este trabajo es brindar a la DGA las alternativas de obras hidráulicas para este tipo de proyectos hidroeléctricos, de esta forma se podrá entregar información al portador del derecho al momento de ejecutar la obra.

6. BIBLIOGRAFÍA

- 1) Allan J. D. 1995. Stream Ecology: Structure and functioning of running water. Londres, Chapman & Hall.
- 2) Alves, M y Bernardo, J. 2000. Contribuição para uma metodologia de determinação do caudal ecológico em cursos de água temporarios. En: 5º Congreso da Água. Lisboa. pp.s.p.
- 3) Arthington, A ; Pusey, B; Brigza, S; Mccosker, R; Bunn, S; Grown, I. 1998. Comparative Evaluation of Environmental Flow Assessment techniques: R & D Requirements. LWRRDC Occasional paper 24/98. ISBN 06426743 X.
- 4) Bayley, P. 1995. Understanding large river floodplain ecosystems. Bioscience 45 (3):153-159.
- 5) Belzile, L; Béruburé, P; Hoang, V. D y Leclerc, M. 1997. Méthode écohydrologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec. En: Reporte presentado por INRS-Eau y Groupe-conseil Génivar inc. al Ministère de l'Environnement et de la Faune. Québec- Canada. 83 p.
- 6) Benetti A ; Lanna, E ; Cobalchini, M. 2003. Metodologías para determinação de vazoes ecológicas em rios. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 8(2): 149-160.
- 7) BMG Consultores 2013, Microcentrales hidroeléctricas: conceptos generales y evaluación técnica económica de proyectos, Coihayque, Chile.
- 8) Bragg, O; Black, A; Duck, R. 1999. Anthropogenic impacts on the hydrology of rivers and lochs. En: Scotland & Northern Ireland Forum for Environmental Research. Report N° W98 (50) II. Stirling, University of Dundee. pp. s.p.
- 9) Brizga, S; Arthington, A; Pusey, B; Kennard, M; Werren, G; Craige, N y Choy, S. 2002. Benchmarking a Top -Down Methodology for Assesing Environmental Flows in Australian Rivers. Environmental Flows in River Systems. En: 4th International Ecohydraulics Symposium Conference Proceeeding. Cape Town. pp. s.p.102

- 10) Código RCW 90/54.020. ESTADOS UNIDOS. Legislación del Estado de Washington, Washington, Estados Unidos, 1971 [en línea]
- 11) Cos, F; Sanchez, T; Ramirez J. 1995. Manual de mini y microcentrales hidráulicas: una guía para el desarrollo de proyectos, Lima, Peru
- 12) Davis M. D y Riestra F. 2002. Instream flow Policies and Procedures within Integrated Water Management in Chile. En: 4th International Ecohydraulics Symposium Conference Proceeding. Cape Town. pp. s.p.
- 13) Decreto 14, Aprueba reglamento para la determinación del caudal ecológico mínimo 2013. www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1053200 acceso el 17 de junio de 2014
- 14) DGA. Chile, 1999. Política Nacional de Recursos hídricos [en línea] <www.dga.cl> [consulta: 24 de abril 2014]
- 15) DGA. Chile, 2002. Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos [en línea] www.dga.cl/secuencias/servicios/derech_Criterios.htm [consulta: 24 de abril 2014]
- 16) F.A.O 1997, Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía. Boletín de Suelos de la FAO – 68, Roma
- 17) García de Jalón y Gonzales del Tánago, 2002 [en línea] www.us.es/ciberico/archivos_acrobat/zaracomun3garciajalon.pdf [consulta: 23 de abril 2014]
- 18) King, J; Tharme, R; Brown, C. 1999. Definition and Implantation of Instream Flows. En: Reporte final para World Commission of Dam. University of Cape Town. pp. s.p.
- 19) Lamb, L.B. 1995. Criteria for evaluating State Instream-Flow programs: deciding what works. Journal of Water Resources Planning and Management 121 (3): 270-274.
- 20) Ley « La loi du 29 juin 1984 ». FRANCIA. Ley para preservar los medios acuáticos y proteger el patrimonio piscícola (Loi: préserver les milieux aquatiques et protéger le patrimoine piscicole), Gobierno de Francia, Francia, París, junio 1984 [en línea] http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/dossier_presse_40eme_anniversaire_loi_1964.pdf [consulta: 7 mayo 2014]

- 21) Ley 814.20. SUIZA. Ley Federal sobre la protección de las aguas. L'Assemblée fédérale de la Confédération suisse. Ginebra, Suiza, enero 1991 [en línea] http://www.admin.ch/ch/f/rs/814_20/a36.html [consultado: 10 mayo 2014]
- 22) Mery, Horacio 2013. Hidráulica aplicada al diseño de obras, Santiago, Chile
- 23) Oficio nro 5524. CHILE. Modificaciones del Código de Aguas. [en línea] http://www.dga.cl/secuencias/%FAltimo_ORD_Congreso_Modif_CA.pdf [consulta: junio 2014].
- 24) Pelissari, V y Sarmiento, R. 2003. Vazão ecológica para o Río Santa María da Vitória, ES. En: 5° Seminario Estadual sobre Saneamento e Meio Ambiente, Vitória-ES. pp. s.p
- 25) Poff, N. L, Allan J. D. 1997. The Natural Flow Regime. *Bioscience* 47 (11): 769-785.
- 26) Poff, N.L; Harts, D.D. 2002. How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal. *Bioscience* 52 (8): 659-668. p 104
- 27) Poff, N.L; Palmer, M.A. 1997. Heterogeneity in Streams: the influence of environmental heterogeneity on patterns and processes in streams. *J.N. Amer. Benthol. Soc.* 16:168-173.
- 28) Poff, N.L; Ward, J.V. 1989. Implications of streamflow variability and predictability for lotic community structure: a regional analysis of streamflow patterns. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science.* 46: 1805-1818.
- 29) Postel, S y Richter, B. 2003. Rivers for life: Managing water for people and nature. Washington, Washigton: Island Press.
- 30) Reiser, D. W; Wesche, T. A; Estes, C. 1989. Status of instream flow legislation and practices in North America. *Fisheries.* 14(2):22-29.
- 31) Richter, B; Baumgartener, J; Powell, J; Braun, D. 1996. A Method for assessing Hidrologic Alteration within Ecosystem. *Conservation Biology* 10 (14):1163-1174.
- 32) Silveira, L.A y Silveira, L.G. 2001. Vazões mínimas. En: *Hidrología Aplicada: a gestão de pequenas bacias hidrográficas.* Porto Alegre, Editorial ABRH, pp.135-176.
- 33) Sotelo, A.G. 1997 *Hidraulica General Vol. 1, Banderas.* México

- 34) Stalnaker, C; Lamb, B; Henriksen, J; Bovee, K; Bartlow, J. 1995. The Instream Flow Incremental Methodology: A Primer for IFIM. En: Washington, DC: U.S. Geological Survey Biological Report 29. 45 p.
- 35) Stanley, V.G; Swanson, F.J ; Mckee, W.A ; Cummins, K.W. 1991. An ecosystem perspective of riparian zones. Bioscience 41(8): 540-551. 105
- 36) Tapia Rodriguez, Gustavo 2012 Metodología para la medición de la velocidad de flujo en un río en el diagnóstico de la socavación en pilas de un puente, utilizando un dispositivo electrónico, Publicación Técnica No. 356, Morelia, México
- 37) Valett, H.M; Dahm, C.N.; Campana, M.E; Morrice, J.A; Baker, M.A; Fellows, C.S.1997. Hydrologic influences on groundwater-surface water ecotones: heterogeneity in nutrient composition and retention. Journal of the North American Benthological Society 16:239-247.
- 38) Washington department of fish and wildlife. 2003. A guide to instream flow setting in Washington State. [en línea] <http://wdfw.wa.gov/> [consulta: 8 abril 2014]

ANEXO A: ESTADO DEL ARTE

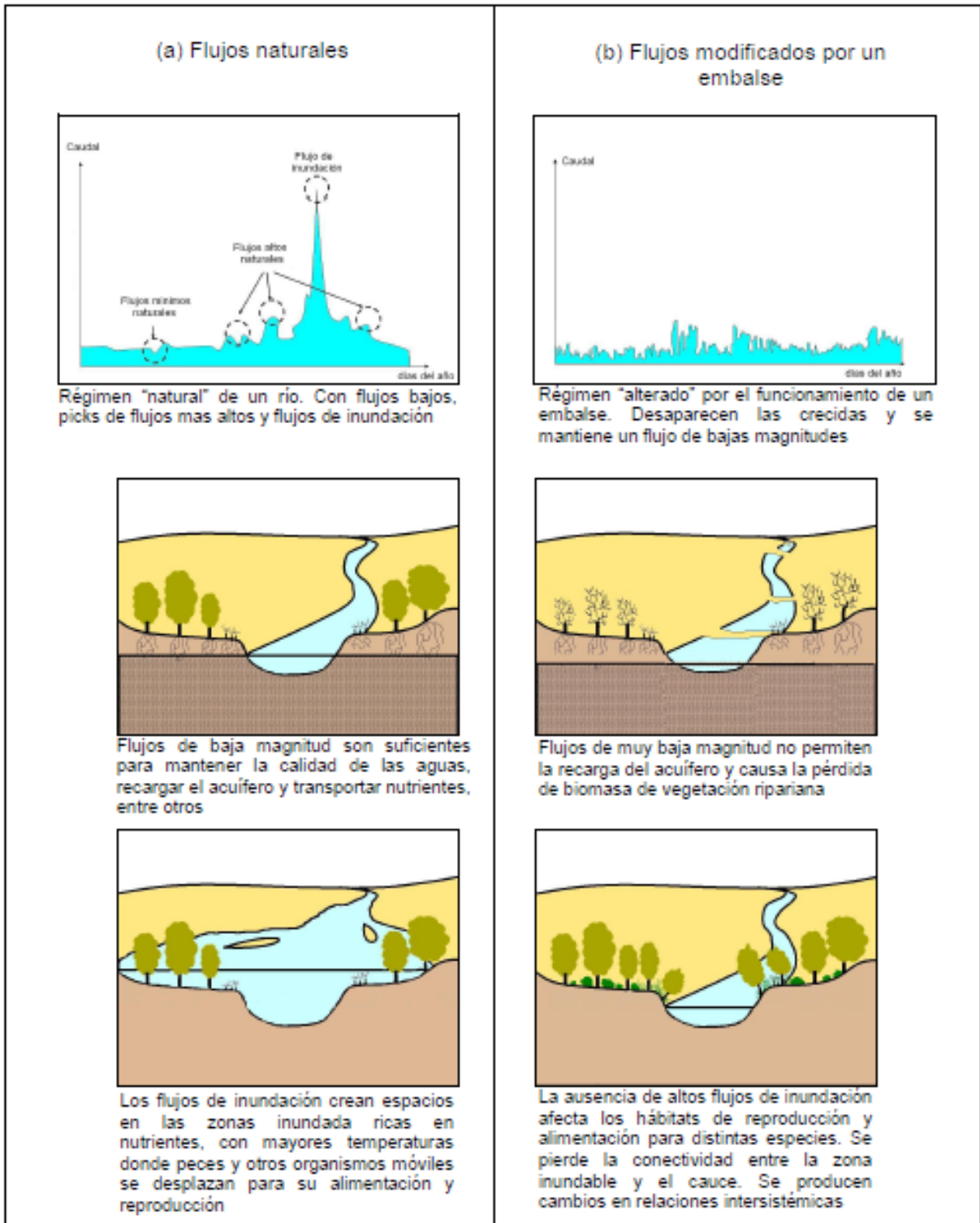


Figura 1. Modificación del régimen natural por los embalses.

Fuente: Postel y Richter, 2003.

Tabla 1. Respuestas ecológicas a la alteración de los elementos del régimen hídrico

Elementos Del régimen	Alteración Específica	Respuesta ecológica
Magnitud y Frecuencia	Incremento de la variación	<ul style="list-style-type: none"> • Arrastre y pérdida de especies sensibles • Aumento de la eliminación algal y arrastre de materia orgánica • Interrupción de los ciclos de vida • Alteración del flujo energético
	Estabilización del caudal	<ul style="list-style-type: none"> • Establecimiento o invasión de especies exóticas • Reducción de agua y nutrientes para las especies vegetales de la zona inundable, causando: <ul style="list-style-type: none"> - Dispersión ineficiente de semillas - Pérdida de hábitat y cauces secundarios necesarios para el establecimiento vegetal - Invasión de la vegetación ripariana dentro del cauce
Predictibilidad	Pérdida de los máximos estacionales del caudal	<ul style="list-style-type: none"> • Perturbación del ciclo íctico • Modificación de la estructura de la red alimenticia • Reducción de la vegetación ripariana • Invasión de vegetación ripariana exótica • Reducción de tasas de crecimiento vegetal
Duración	Caudales bajos Prolongados	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la concentración de organismos acuáticos • Reducción y eliminación de cobertura algal • Disminución de la diversidad de especies vegetal • Desertificación de la composición de especies riparianas • Estrés fisiológico, produciendo reducción de la tasa de crecimiento, cambios morfológicos o mortalidad vegetal • Pérdida de huevos flotantes aguas abajo
	Caudales basales Prolongados	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de cobertura vegetal alterado
	Duración de inundaciones alterada	<ul style="list-style-type: none"> • Cambio del tipo funcional de vegetación • Mortalidad arbórea • Pérdida de los hábitats de corrientes rápidas
Tasa de cambio	Cambios rápidos en el estado del río	<ul style="list-style-type: none"> • Arrastre de especies acuáticas, especialmente en estadios tempranos
	Inundaciones continuas	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de establecimiento de plantas nuevas

Fuente: Poff et al., 1997

ANEXO B:
METODOS DE
OBTENCIÓN DE
CAUDAL
ECOLÓGICO

Las metodologías existentes para determinar caudales ecológicos son numerosas a nivel mundial. Sin embargo, las más aceptadas se pueden agrupar en los siguientes métodos: hidrológicos, hidráulicos, de simulación de hábitat y holísticos. A continuación, se presenta el detalle sobre cada método.

1.1. Métodos hidrológicos

Los métodos hidrológicos se basan en el análisis estadístico de los regímenes de caudales históricos (de décadas o más tiempo). La complejidad con que se analizan estos datos dan como resultado estimaciones de caudales fijos (expresados como caudales mínimos) o de caudales variables (King et al., 1999 y Benetti et al., 2003). Entre los métodos hidrológicos más utilizados se encuentran:

1.1.1. Métodos de curva de permanencia

Este método consiste en la construcción de una curva a partir de datos de caudales diarios, mensuales o anuales donde se presenta la relación entre ciertos rangos de caudales y el porcentaje de tiempo en que cada uno de esos rangos es igualado o excedido (figura 1). El caudal ecológico es expresado como un valor fijo que corresponde a un rango de caudal que se mantiene igualado o excedido un cierto porcentaje de tiempo (Silveira y Silveira, 2003). Generalmente, se recurre al juicio de expertos para estimar ese porcentaje máximo de tiempo y determinar ciertamente un caudal mínimo. Específicamente en Estados Unidos, se han calculado caudales que mantienen niveles mínimos de agua para asegurar la sobrevivencia de poblaciones de peces o invertebrados (King, et al., 1999).

En Brasil, este es uno de los métodos más utilizados para estimar caudales ecológicos. Por ejemplo, en el Estado Pernambuco se calculó indirectamente un caudal ecológico como el 5% de Q90 (Benetti et al., 2003). Por otra parte, en la Provincia de Québec un supuesto base para la estimación de un caudal ecológico es que un porcentaje de tiempo superior a 90 generaría un caudal muy bajo mientras que un porcentaje menor a 50 correspondería a un volumen de agua inútilmente elevado (Belzile et al., 1997).

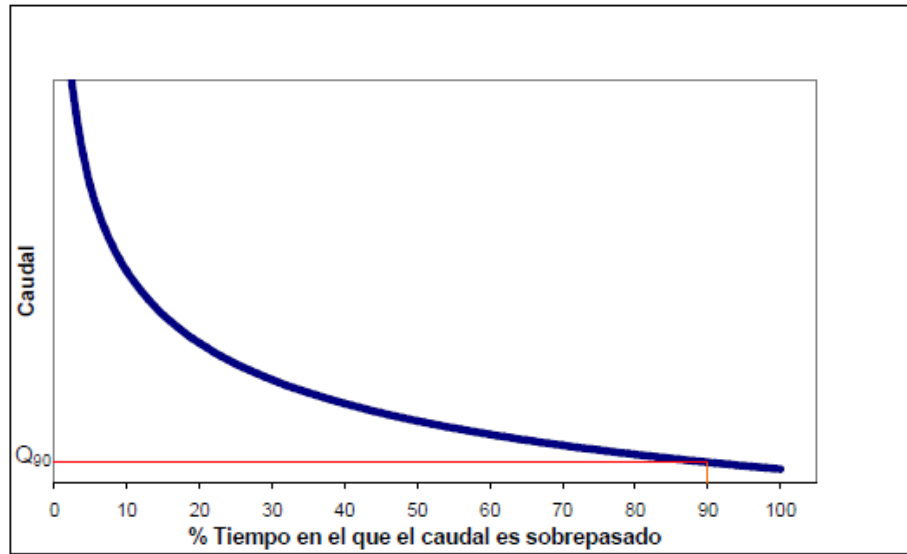


Figura 1: Curva de Permanencia.

Fuente: Propia. Nota: Q_{90} correspondería al caudal que fue sobrepasado el 90 por ciento del tiempo de observación

1.1.2. Método de Tennant o Montana

Este método se basa en un estudio realizado por la US Fish and Wildlife Service en once arroyos ubicados entre los Estados de Montana, Nebraska y Wyoming. El objetivo del mismo era encontrar una relación entre el caudal y la disponibilidad de hábitat para la biota acuática (Tennant, 1976 citado en Bragg et.al, 1999). Tennant dividió el año en un periodo seco y otro lluvioso, para los cuales propuso caudales expresados como porcentajes del caudal medio anual (CAM) relacionándolos con grados de conservación (Tabla 1). Según sus observaciones, el hábitat comenzaba a degradarse cuando el flujo era inferior al 10 por ciento del CAM, mientras que el 60 por ciento se consideró como un flujo suficiente para mantener el hábitat en estado óptimo.

Estos resultados estuvieron asociados a una velocidad media de 0,25 m/s y a una profundidad media de 0,3 m, así como también a las condiciones hidrológicas y geográficas del norte y centro de Estados Unidos.

Tabla 1. Estados de conservación de los ríos de acuerdo a Caudal Anual Mensual

Estado de conservación	% CAM de Octubre a Marzo	% CAM de Abril a Septiembre
Máximo (flushing or maximum)	200%	200%
Rango óptimo (optimum range)	60-100%	60-100%
Sobresaliente (outstanding)	40%	60%
Excelente (excellent)	30%	50%
Bueno (good)	20%	40%
Regular o en degradación (fair or degrading)	10%	30%
Pobre o mínimo (poor or minimum)	10%	10%
Degradación severa (severe degradation)	<10%	<10%

Fuente: Tennant, 1976. Entre paréntesis se encuentran los términos originales en inglés

Este método es uno de los más frecuente y antiguamente utilizados en Estados Unidos desde los años setenta (Postel y Richter, 2003) y aún en las provincias marítimas de Canadá se estima que 0,25 del caudal medio anual es el volumen mínimo requerido para asegurar la vida acuática (independiente de la estación o de la especie) (Cassie y El Jabi, 1995 citado en Belzile et al., 1997). También a partir de modificaciones simples del Método de Tennant en Estados Unidos son desarrollados y aplicados otros métodos como el de Arkansas y Utah, intentando responder a las realidades locales.

1.1.3. Método del caudal mínimo de 7 días con periodo de ocurrencia de 10 años (7Q10)

Este método entrega el valor de un caudal mínimo estadístico 7Q10 que corresponde al valor cuya media en cada diez años será igual o menor que el caudal medio en cualquier evento de 7 días de sequía consecutivos (Silveira y Silveira, 2003).

El método supone que a valores menores que éste puede generarse un stress ecológico, por lo cual, es considerado en algunos países en desarrollo como Brasil aplicable para calcular un caudal ecológico (Benetti et al., 2003).

También existen otras aproximaciones similares utilizando la estadística hidrológica que describe las condiciones de sequía como el “7Q2 “y el “10Q5”.

1.1.4. Método “Range of Variability Approach” (Aproximación por Rangos de Variabilidad)

Según sus propios autores este método ha sido ideado para casos en que se tenga como primer objetivo la conservación de los ecosistemas (Richter et al., 1997). Se basa en datos de largos períodos de tiempo donde se describe la variabilidad hidrológica antes y después de instalado un embalse. Se recomienda un sistema de manejo con objetivos anuales intentando emular o “imitar” las características del flujo natural después del funcionamiento de la represa o hidroeléctrica.

El método comprende al menos 6 pasos básicos:

- 1) Caracterización del flujo natural a través de treinta y dos (32) indicadores de alteración hidrológica (IHA) basados en los parámetros definidos por Richter y colaboradores (1996) (tabla 2).
- 2). Estos indicadores se agrupan en cinco categorías relacionadas con:
 - I. Magnitud del régimen hídrico mensual.
 - II. Magnitud y duración de los extremos anuales.
 - III. Predictibilidad de los extremos anuales.
 - IV. Frecuencia y duración de las magnitudes extremas altas y bajas.
 - V. Tasa y frecuencia de los cambios hidrológicos.
- 2) Estimación de una tendencia central (ejemplo: mediana o media) y de dispersión (desviación estándar o coeficiente de variación) para los 32 indicadores anteriormente descritos.
- 3) Definición de rangos de variabilidad objetivo para cada indicador, ya sea como un valor máximo de la desviación estándar (por ejemplo, los valores deben caer dentro de la Media ± 1 Desviación Estándar) o los valores pueden ser expresados en relación a niveles de percentil (deben estar comprendidos entre el 20 y 80 percentil). Estos objetivos deben estar basados en información ecológica, sin embargo, los autores recomiendan que frente a la ausencia de la misma se puede utilizar el criterio de ± 1 la Desviación Estándar (SD).
- 4) Diseño de un sistema de manejo de acuerdo a los objetivos de rangos de variación.
- 5) Monitoreo paralelo a un programa de investigación ecológica para determinar los efectos del manejo (una vez que el proyecto comienza su funcionamiento).

6) Revisión anual del cumplimiento de objetivos y adaptación de los mismos a los resultados de monitoreo.

La figura 2 muestra los valores de caudales registrados en el día del año que el caudal observado fue el máximo antes y después de instalado un embalse en las aguas del río Roanoke (Carolina del Norte). Para este parámetro se estimó un rango de variación máximo de ± 1 la SD. En este caso, los valores de caudales máximos no deberían ser menores a la Media más la Desviación Estándar (Richter et al., 1997).

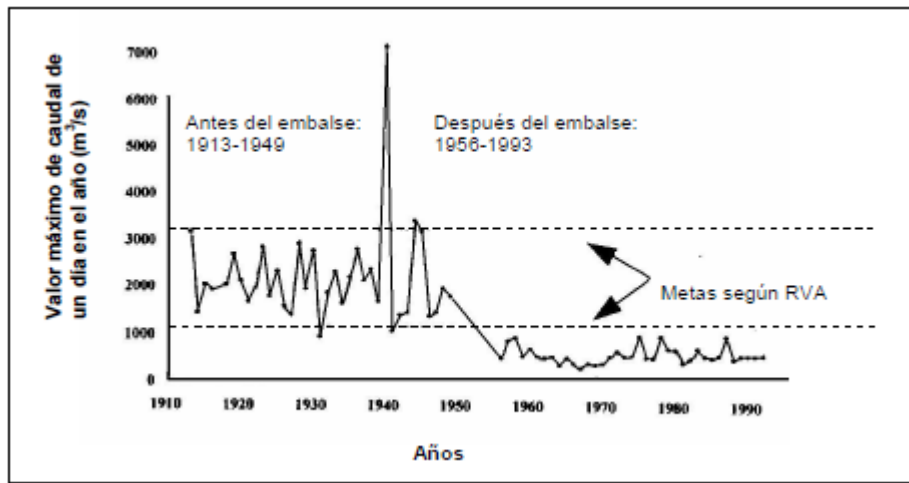


Figura 2: Valores de caudal máximo de un día para cada año en el río Roanoke antes y después instalado un embalse.

Fuente: Richter et al., 1997. Las líneas punteadas muestran la Media y la Desviación Estándar

Tabla 2. Parámetros hidrológicos utilizados para definir los indicadores de alteración Hidrológica en método RVA

Grupos estadísticos	Elementos del régimen hidrológico	Parámetros hidrológicos
Grupo 1: Magnitud de flujos Mensuales	Magnitud, predictibilidad	Promedio mensual del caudal Mínima anual (1 día) Máxima anual (1 día)
Grupo 2: Magnitud y duración de condiciones extremas anuales	Magnitud, duración	Mínima anual (3 días) Máxima anual (3 días) Mínima anual (7 días) Máxima anual (7 días) Mínima anual (30 días) Máxima anual (30 días) Mínima anual (90 días) Máxima anual (90 días)
Grupo 3: Predictibilidad de condiciones extremas anuales	Predictibilidad	Fecha del mes de julio para cada máximo anual de un día Fecha del mes de julio para cada mínimo anual de un día
Grupo 4: Frecuencia y duración de pulsos de caudales altos/bajos	Frecuencia, Duración	Número de pulsos altos cada año Número de pulsos bajos cada año Promedio de la duración de los pulsos altos entre cada año (días) Promedio de la duración de los pulsos bajos entre cada año (días)
Grupo 5: Tasa de cambio/frecuencia de cambio de las condiciones hidrológicas	Tasa de cambio, frecuencia	Promedio de todas las diferencias positivas entre valores de caudales diarios consecutivos Promedio de todas las diferencias negativas entre valores de caudales diarios consecutivos Número de aumentos Números de caídas

Fuente: Richter et al., 1996.

En términos de gestión, en el método RVA puede ser aplicado en una amplia variedad de ecosistemas. En tanto, sus costos son considerados de bajos a medios con una complejidad mayor a la de métodos hidrológicos simples (King et al., 1999).

1.2. Métodos Hidráulicos

Estos métodos generalmente se basan en estudios de una sección transversal para así relacionar la magnitud del caudal con la profundidad de los cauces, velocidad y perímetro mojado. Han sido frecuentemente utilizados en Estados Unidos (Reiser et al, 1989) pero se consideran como precursores de otros más sofisticados como los de simulación de hábitat que usan datos de muchas secciones transversales asociadas a información biológica y de micro hábitat. Dentro de éstos, el método del perímetro mojado es uno de los más conocidos y utilizados (Bragg et.al, 1999 y Benetti et.al., 2003).

1.2.1. Método del perímetro mojado

En este método se asume que la integridad del hábitat está directamente relacionada con el área húmeda. Consiste básicamente en la construcción de curvas que muestran la relación entre el caudal y el perímetro mojado. A partir de ellas puede observarse que hasta un cierto volumen de agua el perímetro crece rápidamente a medida que aumenta la descarga pero sobrepasado este volumen el perímetro se mantiene casi constante. Generalmente el flujo recomendado es aquel cerca de este punto de inflexión, pues se presume es el nivel óptimo para el desove de peces o para la producción de invertebrados bentónicos (figura 3) (Stalnaker et al., 1995).

Este método ha sido aplicado principalmente en ríos que presentan secciones transversales relativamente anchas, rectangulares y poco profundas, lo cual no es representativo de todos los ríos (Stalnaker et al., 1995). Por otra parte, los métodos hidráulicos en general presuponen que la morfología del lecho se mantiene estable a lo largo del tiempo y que las pocas secciones transversales estudiadas son representativas de las características generales de los ríos, lo cual hace difícil su aplicación en zonas con elevada variabilidad morfológica como es el caso de los cursos de agua de regiones semi- áridas (Alves y Bernardo, 2000). Al igual que con métodos hidrológicos simples, no se definen pasos posteriores al cálculo del caudal y sus costos y complejidad son relativamente bajos (King et al., 1999).

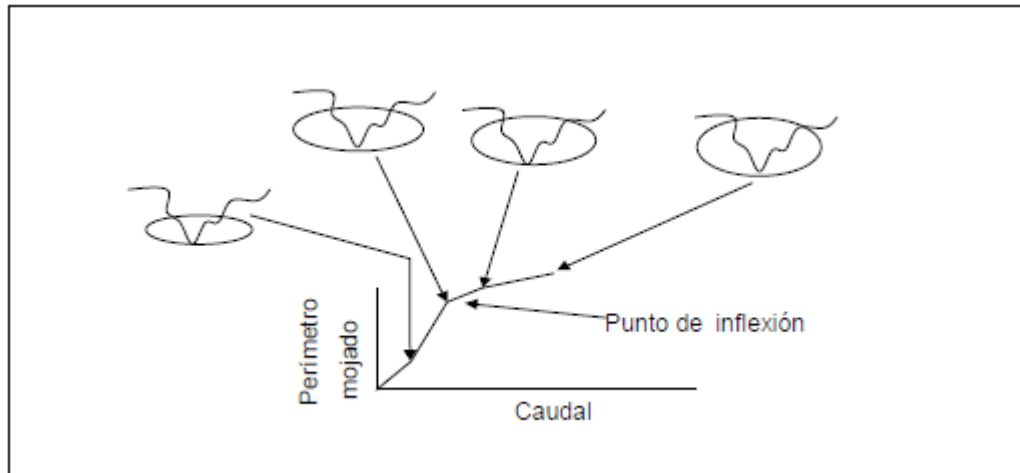


Figura 3: Relación entre caudal y perímetro mojado

Fuente: Stalnaker et al., 1995 (Modificado por el autor).

1.3. Método de simulación de hábitat

Entre los métodos de simulación de hábitat el más utilizado y del cual se derivan los demás, se encuentra:

1.3.1. Método de Instream Flow Incremental (IFIM)

Desarrollado por la US Fish and Wildlife Service este método integra modelos analíticos hidráulicos junto con el estudio de la calidad del agua, sedimentos, estabilidad de los canales, temperatura y otras variables que afectan la producción de peces.

Debido a que en este método se presupone que el hábitat de los peces está determinado por las características hidráulicas existen modelos para predecir profundidades y velocidades en función de un cierto caudal. Dentro de estos modelos el más conocido se denomina IFG4. El mismo se calibra y construye a partir de datos de campo donde se crea una celda por cada punto de medición a lo largo de una transecta. Cada celda tiene una velocidad y profundidad media relacionada con características geomorfológicas del cauce y un caudal particular (Pelissari y Sarmiento 2003, Washington Department of Fish and Wildlife, 2003)

Por otra parte, se construyen índices y curvas de adaptación por especie para cada variable de velocidad, profundidad y características geomorfológicas. Estos índices pueden construirse de

diversas maneras, ya sea por opinión de expertos y/o por observación directa. Las curvas varían dependiendo de la especie y del estado en su ciclo biológico. A continuación, se estima el área utilizable o necesaria para cada especie generalmente relacionando los índices de adaptación con el área de estudio.

De esta manera, con la ayuda de un modelo computarizado, usualmente con el Physical Habitat Simulation System (PHABSIM) se estima el área de micro hábitat por especie generado a un cierto caudal. Finalmente, se determina un caudal ecológico como aquel que optimice la relación volumen de agua/área de micro hábitat.

En la figura 4 se presentan los resultados de un estudio realizado en el Río Santa Maria da Vitória (Estado Espirito Santo de Brasil). En la misma se muestran curvas que presentan los índices de habitabilidad (o adecuación) para la especie *Astyanax aff. taeniatus* (una de las tres poblaciones de peces estudiadas) a distintos valores de profundidad, velocidad e “índices del cauce” (el último fue construido por la combinación de valores otorgados a la composición granulométrica de las partículas del sustrato (del 1 al 5) y valores de cobertura de la vegetación (del 1 al 3)). Finalmente, se muestra la curva (B) caudal versus el Área Utilizable Ponderada (AUP).

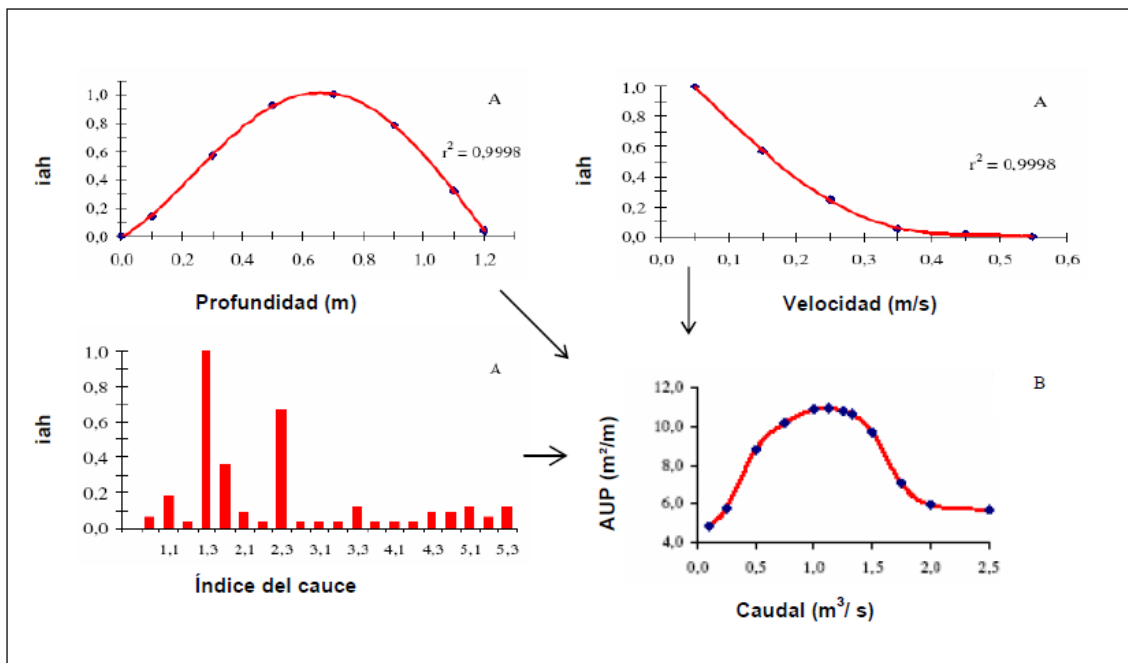


Figura 4: Curvas de índices de habitabilidad (iah) para la especie *Astyanax aff.taeniatus* en el río Santa Maria da Vitória y Curva de Área Utilizable Ponderada vs. Caudal

Fuente: Pelissari y Sarmento, 2003

En términos de gestión la aplicabilidad de este método en cursos de agua de regiones semiáridas es restringida por el hecho de que existen caudales muy bajos y con una alta diversidad

morfológica lo que impide o dificulta caracterizar el curso de agua en base a algunas transectas (Alves y Bernardo, 2000). En tanto, su complejidad y costos son altos (King et al., 1999).

1.4. Métodos holísticos

Se considera que el régimen hidrológico natural mantiene:

- la biota de un cauce,
- la geomorfología del canal,
- los sistemas riparianos y,
- sistemas en las áreas de inundación, así como los sistemas de estuarios y costeros que son afectados por el flujo de agua dulce.

Los métodos holísticos generalmente han adoptado dos aproximaciones distintas o combinan las mismas (Arthington et al., 1998)

- Aproximación de abajo hacia arriba (bottom-up approach): donde el caudal recomendado o la variación del mismo es estimado a partir de un flujo mínimo hacia valores más altos.

- Aproximación de arriba hacia abajo (top-down): el caudal es determinado a partir de un flujo máximo aceptable hasta valores menores intentando emular las características del régimen natural.

Este tipo de método se basa en el juicio de expertos y consiste en jornadas de trabajo que dan como resultado la descripción de un régimen hidrológico mes a mes y elemento por elemento, donde cada elemento representa una característica bien definida del régimen hidrológico asociada a objetivos explícitos y claros ya sean de tipo ecológicos, de calidad de agua y/o sociales (King y Louw, 1998).

1.4.1. Método de benchmarking ~ aproximación Top-Down

Este método se basa en principios similares al método de Building Block. Con información disponible, modelos conceptuales y juicio de experto se identifican indicadores hidrológicos que son considerados ecológicamente relevantes. Con estos indicadores son caracterizados arroyos de referencia o “bench mark reaches”.

En estos cauces de referencia no existe necesariamente un flujo natural pero son escogidos porque cubren variados tipos y niveles de flujo que se registran en la cuenca. En estos cauces se estudian las consecuencias ecológicas que se han producidos por cambios en el flujo natural y se predicen los impactos potenciales frente al incremento del consumo del agua o la instalación de nuevas represas o embalses que modificarían los regimenes actuales de flujo (Brizga et al., 2002).

Esta metodología cuenta con cuatro pasos claves:

- a. Formación de un panel técnico (TAP, Technical Advisory Panel) y desarrollo de un modelo hidrológico para la cuenca hidrográfica.
- b. Determinación y evaluación actual y futura de las condiciones ecológicas de los arroyos en relación con un estado del río conocido.
- c. Evaluación de los riesgos ambientales por cambios en el flujo.
- d. Evaluación de escenarios futuros posibles.

Los grupos de trabajo son conformados por especialistas de formación similar a los del método Building Blocks, sin embargo estos deben preguntarse hasta que punto puede modificarse el flujo para alcanzar un objetivo dado.

Como se aprecia, los métodos de tipo holísticos son bastantes más complejos dado que se requiere un esfuerzo más grande de gestión para coordinar los grupos de trabajos, salidas a terreno, etc., de esta manera sus costos también se elevan. Sin embargo, en términos generales pueden ser aplicados en cualquier ecosistema lótico (King et al., 1999).

**ANEXO C:
ENTREVISTA A
DIRECCIÓN
GENERAL DE
AGUAS
CONCEPCIÓN**

¿Cuáles son los criterios utilizados por parte de la DGA, para otorgar caudales ecológicos en proyectos de mini centrales antes y después del decreto N°14 2013?

El criterio es único, para otorgar un caudal ecológico a través de una resolución de constitución de un derecho que es independiente del uso que tú le vas a dar finalmente, ya sea hidroeléctrico, riego, u otro tipo, el único decreto supremo establecido en este momento, es el DS N°14, por lo tanto no hay otro. Que en el fondo lo que hace es comparar caudales medios mensuales con los caudales medios anuales y determinar ahí, cual es el que se va a fijar, ahora la forma de obtener esos antecedentes también aparece en el DS N°14, el cual especifica que se deberá utilizar una estadística hidrológica de los últimos 25 en el punto donde se va a otorgar este derecho.

¿Cuáles son los métodos utilizados, para determinar este caudal?

El método más utilizado y que aparece por defecto en el DS N° 14, es el método hidrológico con una estadística hidrológica de 25 años, que, en caso de no contar con estos datos, se deberá generar por parte de la Dirección General de Aguas (DGA).

¿Qué instrumentos de medición, se utilizan para determinar este caudal aguas debajo de una presa?

Cuando se constituye un derecho en la resolución de constitución queda establecido que es el peticionario del derecho, el que va a tener que instalar un sistema de medida que permita determinar o verificar en el fondo, cual es el caudal ecológico que debe dejar pasar según la resolución. No está establecido que tipo de obra será la que finalmente se utilice en terreno.

¿Qué sucede si al momento de medir, se encuentran caudal menos al otorgado por la DGA?

Se inicia un proceso de fiscalización donde se puede demandar al peticionario del derecho porque está infringiendo el código de agua, por lo tanto puede estar asociado a una multa que puede cursar la DGA o puede seguir un camino judicial cuando no hay cambios luego de una amonestación, donde será un juez el que decide el camino a seguir.

¿Qué opina acerca de las nuevas obras hidráulicas, que entregan este caudal? (tuberías, orificios, vertederos, etc.)

Como estas obras son menores, por lo tanto no están sometidas al proceso de evaluación de impacto ambiental donde la DGA si tiene injerencia para sugerir o comentar respecto a las obras, no existe una estandarización y menos conocimiento de obras hidráulicas que satisfagan esta variabilidad. Dicho esto, el sistema que el peticionario adopte y cumple con las condiciones será el óptimo.

¿Qué información se maneja, acerca de soluciones implementadas en otros países?

Se manejan estudios y recomendaciones tanto de la F.A.O (Food and Agriculture Organization) como de la Universidad de Concepción. Los cuales entregan alternativas viables para la entrega de caudal ecológico.

A su criterio, ¿Qué opina del nuevo DS N°14 2013, que viene a modificar el cálculo de caudal ecológico de un criterio anual, a mensual?

El criterio que existía anterior a este, de igual forma contaba con una variabilidad mensual pero asociado a una cuenca o subcuenca territorial, lo que personalmente parecía un criterio bastante adecuado ya que sabemos que las cuencas costeras por ejemplo son muy distintas a las cuencas con influencias nivales de la cordillera. Ahora lo que hace el nuevo criterio, es estandarizar a nivel nacional el cálculo del caudal ecológico, lo que parece no ser la mejor opción. Aun así cuenta con datos hidrológicos de los últimos 25 años que parece ser una decisión acertada.

ANEXO D:
DECRETO
SUPREMO N°14

APRUEBA REGLAMENTO PARA LA DETERMINACION DEL CAUDAL ECOLOGICO MINIMO

Núm. 14.- Santiago, 22 de mayo de 2013.- Vistos y considerando: Lo dispuesto en los artículos 32 números 6 y 35 de la Constitución Política de la República de Chile, cuyo texto ha sido refundido, coordinado y sistematizado por el decreto supremo N° 100, de 2005, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia; en la Ley N° 18.575, Orgánica Constitucional de Bases Generales de la Administración del Estado, cuyo texto refundido, coordinado y sistematizado fue fijado por el decreto con fuerza de ley N° 1, de 2000, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia; en el artículo 129 bis 1 del Código de Aguas; en la Ley N° 19.880, de Bases de los Procedimientos Administrativos que Rigen los Actos de los Órganos de la Administración del Estado; y el Acuerdo del Consejo de Ministros para la Sustentabilidad N° 4, de fecha 22 de marzo de 2012.

Decreto:

Apruébase el siguiente Reglamento para la Determinación del Caudal Ecológico Mínimo:

TÍTULO I

Disposiciones generales

Artículo 1°.- El presente reglamento establece los criterios por los cuales se regirá la determinación del caudal ecológico mínimo, de conformidad con lo establecido en el artículo 129 bis 1 del Código de Aguas.

Artículo 2°.- Los plazos establecidos en este reglamento son de días hábiles, entendiéndose que son inhábiles los días sábado, domingo y festivos.

TÍTULO II

Criterios para la determinación del Caudal Ecológico Mínimo para el otorgamiento de derechos de aprovechamiento de aguas

Artículo 3°.- La Dirección General de Aguas velará por la preservación de la naturaleza y la protección del medio ambiente, debiendo para ello establecer un caudal ecológico mínimo para los nuevos derechos de aprovechamiento de aguas que se constituyan en cada fuente superficial.

Para cada mes del año, el caudal ecológico mínimo en el punto de captación solicitado se determinará considerando los siguientes criterios:

- a. El caudal equivalente al veinte por ciento del caudal medio mensual de la respectiva fuente superficial con el límite máximo del veinte por ciento del caudal medio anual establecido en el artículo 129 bis 1 del Código de Aguas.
- b. La utilización de estadísticas hidrológicas de los últimos 25 años.
- c. En el caso de que para una fuente determinada no exista esta estadística, la Dirección General de Aguas la generará utilizando el método hidrológico más adecuado al caso concreto, de aquellos conocidos y aceptados por la técnica, lo que deberá quedar claramente fundado en el informe técnico de que trata el artículo 5°.

Para aquellos derechos de aprovechamiento de agua cuya captación se haga mediante un embalse, el cumplimiento del caudal ecológico mínimo que se fije se verificará inmediatamente aguas abajo de la barrera ubicada en el álveo.

Artículo 4°.- Las organizaciones de usuarios y el propietario exclusivo de un acueducto que extraiga aguas de un cauce, deberán instalar en la obra de captación un sistema de control que permita controlar y aforar el agua que se extrae.

Artículo 5°.- Al resolver una solicitud de un nuevo derecho de aprovechamiento de aguas, la Dirección General de Aguas elaborará un informe técnico que será parte del expediente y que contendrá la determinación del caudal ecológico mínimo que se aplicará a dicho derecho.

TÍTULO III

Casos calificados para la determinación del caudal ecológico mínimo por parte del Presidente de la República

Artículo 6°.- El Ministerio de Obras Públicas, en casos calificados, mediante decreto supremo y previo informe favorable del Ministerio del Medio Ambiente, podrá fijar un caudal ecológico mínimo diferente al establecido en el artículo 3° de este reglamento, no pudiendo afectar derechos de aprovechamiento de aguas ya existentes.

Previo a su dictación, dicho decreto supremo se sujetará a lo dispuesto en el artículo 71 letra f) de la ley N° 19.300.

El caudal ecológico mínimo que se fije en virtud de lo dispuesto en el presente título se establecerá para un cauce, para una sección o para un sector de aquel y no podrá superar el cuarenta por ciento del caudal medio anual de la respectiva fuente superficial en dicho cauce, sección o sector.

Artículo 7°.- Son casos calificados aquellos en los que se identifiquen riesgos en la calidad de las aguas y/o el hábitat de magnitud tal que comprometan la supervivencia de las especies, de acuerdo a alguno de los siguientes criterios, los que deberá tener en consideración el Ministerio del Medio Ambiente al emitir su informe:

a) Cuando se pretenda conservar aquellas especies hidrobiológicas que se encuentren dentro de alguna de las categorías de conservación, a excepción de aquellas clasificadas como Preocupación Menor o Casi Amenazada, de acuerdo al artículo 37 de la ley N° 19.300 y su Reglamento, y el hábitat tenga una calidad tal que permita la sustentación de las especies;

b) Cuando existan fuentes superficiales que se encuentren localizadas en cualquier porción de territorio, delimitada geográficamente y establecida mediante acto de autoridad pública, colocada bajo protección oficial con la finalidad de asegurar la diversidad biológica, tutelar la preservación de la naturaleza y conservar el patrimonio ambiental, o aguas arriba de éstas, que tengan una calidad tal que permita la sustentación de las especies protegidas del área, o

c) Cuando existan impactos significativos que alteren factores bióticos y abióticos, físicos, químicos y biológicos, que aseguran el resguardo de la estructura, dinámica y funcionamiento de los ecosistemas asociados a la fuente de agua superficial, con el fin de mantener los servicios ambientales que prestan. Para estos efectos se considerarán las siguientes variables ambientales:

i. Los valores de las concentraciones en la calidad de las aguas del cauce, en relación a las normas de calidad ambiental vigentes;

ii. La predicción de pérdidas significativas de refugio y/o hábitat que puedan afectar las zonas de alimentación, reproducción o bien puedan producir un menoscabo en las comunidades y poblaciones acuáticas identificadas;

iii. Cuando por efecto de la disminución de caudal o modificación del régimen hidrológico natural, pueda afectar la dinámica del ecosistema favoreciendo la proliferación de especies exóticas introducidas, poniendo en riesgo los sitios de alimentación, reproducción y/o refugio de especies en categorías de conservación.

iv. Cuando las alteraciones de la estructura, dinámica y funcionalidad del ecosistema, derivados de la disminución del caudal, den origen a un plan de manejo de acuerdo a lo establecido en la letra a) del artículo 42 de la ley N° 19.300.

Artículo 8°.- El Ministerio del Medio Ambiente y la Dirección General de Aguas podrán coordinarse para elaborar estudios sobre las condiciones sitio-específicas de cuencas, subcuencas y/o zonas hidrográficas del país que permitan a la autoridad competente contar con mayor información para determinar el caudal ecológico mínimo conforme a este título.

Artículo 9°.- Cualquier persona podrá solicitar la declaración de un caudal ecológico mínimo en una fuente superficial, de acuerdo a lo señalado en el artículo 6° de este reglamento. La

solicitud deberá presentarse ante la Dirección General de Aguas y no suspenderá los procedimientos de constitución de derechos de aprovechamiento de aguas en trámite seguidos ante dicha repartición. Dicha solicitud deberá contener:

- a) El nombre y demás antecedentes que individualicen al solicitante;
- b) La cantidad de agua que se pretende fijar como caudal ecológico mínimo, expresado en medidas métricas por unidad de tiempo;
- c) Los puntos o tramos de cauces, sección o sector sobre los cuales se pretende fijar el caudal ecológico mínimo y la región, provincia y/o comuna en que estén ubicadas o que recorran;
- d) Una justificación técnica de la causal invocada de acuerdo al artículo 7° de este reglamento, con los estudios pertinentes;
- e) Una caracterización general del cauce, teniendo especial consideración por el régimen hidrológico, la calidad de las aguas, los ecosistemas presentes y los usos y actividades que se desarrollan en él, y
- f) Una explicación técnica de los efectos sobre la preservación de la naturaleza y la protección del medio ambiente que produciría la no declaración del caudal ecológico mínimo solicitada.

Si la solicitud no reúne los requisitos señalados en este artículo, se requerirá al interesado para que, en un plazo de cinco días, subsane la falta o acompañe los documentos respectivos, con indicación de que, si así no lo hiciera, se le tendrá por desistido de su petición, sin perjuicio de la facultad establecida en el artículo 11° de este reglamento.

Artículo 10°.- Cumplidos los requisitos que dispone el artículo 9° de este reglamento, la Dirección General de Aguas remitirá, en un plazo no superior a diez días, los antecedentes de la solicitud al Ministerio del Medio Ambiente para que éste, en un plazo no superior a veinte días, evacue su informe.

Para la elaboración de dicho informe, el Ministerio del Medio Ambiente podrá efectuar los análisis en terreno que correspondan y pedir antecedentes a los órganos de la Administración del Estado que estime competentes para mejor informar.

Evacuado el informe del Ministerio del Medio Ambiente, la Dirección General de Aguas remitirá todos los antecedentes al Ministerio de Obras Públicas para que éste resuelva las respectivas solicitudes.

Artículo 11°.- Si se pretende fijar de oficio este caudal ecológico mínimo, el Ministerio de Obras Públicas deberá solicitar a la Dirección General de Aguas y al Ministerio del Medio Ambiente, informe fundado acerca de la pertinencia de declarar el caudal ecológico mínimo en

cuestión, pudiendo el Ministerio del Medio Ambiente efectuar las mismas diligencias que el inciso segundo del artículo 10° de este reglamento dispone para la elaboración de su informe.

Artículo 12°.- La fijación del caudal ecológico es sin perjuicio de lo que puedan establecer otras autoridades en el ámbito de sus respectivas competencias.

Anótese, tómese razón y publíquese.- SEBASTIÁN PIÑERA ECHENIQUE, Presidente de la República.- María Ignacia Benítez Pereira, Ministra del Medio Ambiente.- Laurence Golborne Riveros, Ministro de Obras Públicas.

Lo que transcribo a Ud. para su conocimiento.- Rodrigo Benítez Ureta, Subsecretario del Medio Ambiente (S).