

Guía para la elaboración de estudios de caudales ecológicos

en proyectos
de aprovechamiento
de recursos hídricos

Título

Guía para la elaboración de estudios de caudales ecológicos
en proyectos de aprovechamiento de recursos hídricos

Depósito legal: DC2021000139

ISBN: 978-980-422-213-9

Editor

CAF

Autor

Tatiana Kucharsky Villarreal

Equipo de trabajo CAF

Edgar Salas

Sandra Mendoza

Diseño gráfico

Estudio Bilder—Buenos Aires

Fotografías

Sylvain Gilm (p. 25), Héctor Ramón Pérez (p. 53), Jairo Gallegos (p. 93)

Las ideas y planteamientos contenidos en esta publicación
son de exclusiva responsabilidad de su autor
y no comprometen la posición oficial de CAF.

Esta y otras publicaciones se encuentran en scioteca.caf.com

© 2018 Corporación Andina de Fomento

Guía para la elaboración de estudios de caudales ecológicos en proyectos de aprovechamiento de recursos hídricos

Contenido

● **Introducción** 9

Antecedentes 9

Objetivos 9

Definiciones importantes 9

Consideraciones generales 10

Enfoque 10

Contenido de la guía 10

● **Impactos generados por proyectos de aprovechamiento hídrico con embalses** 13

Introducción 13

Tipos de proyectos de aprovechamiento hídrico 13

Impactos que generan los proyectos de aprovechamiento hídrico con embalses 13

Descripción de los procesos que se generan en los embalses 14

Cambios que se generan aguas abajo de los embalses 20

● **Procedimiento para el estudio y la determinación de caudales ecológicos** 27

Etapa I. Descripción del proyecto 27

Introducción 27

Descripción del proyecto 28

Etapa II. Caracterización del sistema hídrico (físico y biótico) 30

Introducción 30

Caracterización física 31

Caracterización ecológica 43

Caracterización antrópica 51

Conclusiones generales de la caracterización del sistema hídrico 52

Etapa III. Selección del grupo de metodologías de cálculo de caudales ecológicos recomendables 54

Introducción 54

Procedimiento 55

Etapa IV. Descripción de los grupos de metodologías de cálculo de caudales ecológicos 64

Introducción 64

Métodos hidrológicos 64

Métodos hidráulicos 65

Métodos de simulación del hábitat 69

Etapa V. Verificación de los caudales ecológicos adoptados 76

Introducción 76

Verificación del cumplimiento: cantidad y régimen de los caudales ecológicos 76

Verificación del cumplimiento: calidad de los caudales ecológicos 77

Verificación de cantidad y calidad en proyectos con alteraciones altas al sistema hídrico 77

Caudales ecológicos a aplicar 79

● **Glosario** 81

● **Bibliografía** 85

Sobre normativa existente 85

Sobre guías para el cálculo de caudales ecológicos 87

Sobre estudios y proyectos relacionados con caudales ecológicos 89

Sobre embalses y aspectos bióticos de interés 90

Bibliografía complementaria 92

● **Anexo** 94

Cuadros

- Cuadro 2.1** Valores del índice del estado trófico clasificados en función del estado trófico 18
- Cuadro 3.1** Relaciones ecohidrológicas interpretadas a través de los criterios del régimen hidrológico natural (Poff et al, 1997), según los diferentes componentes del hidrograma y los procesos ecológicos que dependen de ellos 32
- Cuadro 3.2** Caracterización de periodos secos y húmedos según el método del percentil 33
- Cuadro 3.3** Criterios para la clasificación de tipos de cauce atendiendo a la sinuosidad del trazado, a la forma de la sección transversal y a la pendiente longitudinal 36
- Cuadro 3.4** Unidades susceptibles de ser incluidas en la descripción morfológica del río 38
- Cuadro 3.5** Calidad del agua y valores de OD aceptables 40
- Cuadro 3.6** Calidad del agua y valores de pH aceptables 40
- Cuadro 3.7** Efectos del pH sobre los organismos acuáticos 41
- Cuadro 3.8** Calidad del agua y valores de $\text{NO}_3^- \text{N}$ aceptables 41
- Cuadro 3.9** Calidad del agua y valores de fosfato aceptables 42
- Cuadro 3.10** Calidad del agua y valores de DBO5 aceptables 42
- Cuadro 3.11** Parámetros básicos de calidad de agua y su clasificación 43
- Cuadro 3.12** Puntaje de las familias de macroinvertebrados acuáticos para el índice BMWP en Colombia (Roldán, 2003) 47
- Cuadro 3.13** Clases de calidad de agua, valores BMWP en Colombia. Significados y colores para representaciones cartográficas. 47
- Cuadro 3.14** Algunos ecosistemas y los servicios que prestan 49
- Cuadro 3.15** Calificación de la magnitud del proyecto 55
- Cuadro 3.16** Calificación de la cuenca según su área de aporte 55
- Cuadro 3.17** Calificación de la importancia del proyecto respecto al entorno físico 56
- Cuadro 3.18** Calificación del indicador de importancia ecológica 56
- Cuadro 3.19** Calificación del indicador de servicios ambientales 57
- Cuadro 3.20** Calificación de la importancia ambiental 57
- Cuadro 3.21** Calificación de la alteración del sistema hídrico (físico-biótico) por el proyecto 57
- Cuadro 3.22** Grupo de métodos de cálculo de caudales ecológicos recomendados de forma preliminar 58
- Cuadro 3.23** Métodos hidrológicos 59
- Cuadro 3.24** Métodos hidráulicos 60
- Cuadro 3.25** Métodos hidrobiológicos y de simulación del hábitat 62
- Cuadro 3.26** Regímenes de caudales para peces, vida acuática, recreación y otros recursos ambientales relacionados 65
- Cuadro 3.27** Métricas seleccionadas para la construcción del índice de integridad del hábitat (IIH) para la determinación de caudales ambientales en ríos colombianos 78
- Cuadro 3.28** Variables físicas y químicas, y sus puntajes, utilizadas en la construcción del índice de integridad del hábitat (IHH) para la determinación de caudales ambientales en ríos colombianos 78
- Cuadro 3.29** Puntajes del IIH para la determinación de caudales ambientales en ríos colombianos 79

Recuadros

- Recuadro 3.1** Simulación hidráulica 71
- Recuadro 3.2** Simulación del hábitat 72
- Recuadro 3.3** Relaciones hábitat-caudal 75

Figuras

- Figura 1.1** Esquema de la Guía 11
- Figura 2.1** Impactos que ocasionan los proyectos con embalses 14
- Figura 2.2** Esquema simplificado de una cadena acuática, destacando la dirección del flujo de energía y las variables ambientales que actúan sobre la estructura y la dinámica del sistema 15
- Figura 2.3** Esquema con los principales compartimientos y vectores de flujos, y cambios entre los compartimientos de los embalses 16
- Figura 2.4** Cambios físicos, químicos y biológicos en la calidad del agua, causados por el proceso de eutrofización 17
- Figura 2.5** Estratificación térmica de un lago o embalse 19
- Figura 2.6** Exclusión competitiva de las especies A y C por la especie B al pasar del régimen térmico natural al regulado (en las ordenadas se muestran los rangos óptimos de las tres especies) 22
- Figura 2.7** Fluctuaciones del caudal en un río provocadas por el aprovechamiento hidroeléctrico 24
- Figura 3.1** Etapas para el estudio y determinación de caudales ecológicos 27
- Figura 3.2** Actividades de la etapa I del procedimiento 27
- Figura 3.3** Componentes generales de un proyecto de aprovechamiento de recursos hídricos con presa para consumo humano 28
- Figura 3.4** Componentes generales de un proyecto de aprovechamiento de recursos hídricos con presa para riego 29
- Figura 3.5** Componentes generales de un proyecto de aprovechamiento de recursos hídricos con presa para generación de energía 29
- Figura 3.6** Actividades de la etapa II del procedimiento 30
- Figura 3.7** Representación de los aspectos ecológicos e hidrológicos del régimen natural, para el caso de un río de montaña en la Amazonia Sur del Ecuador 33
- Figura 3.8** Escalas de análisis de los cauces 35
- Figura 3.9** Clasificación de los cauces fluviales atendiendo a su pendiente longitudinal, la sección del cauce y la sinuosidad de trazado 37
- Figura 3.10** Distintas secciones transversales en función de la naturaleza del sustrato y su correspondencia con el trazado longitudinal 37
- Figura 3.11** Clasificación granulométrica de Wentworth/Doeglas y DIN 4022 39
- Figura 3.12** Comunidades bentónicas 44
- Figura 3.13** Macroinvertebrados acuáticos 45
- Figura 3.14** Especies de peces indicadoras 45
- Figura 3.15** Resumen de la información más importante del diagnóstico del sistema hídrico 52
- Figura 3.16** Actividades de la etapa III del procedimiento de selección de la Metodología de Cálculo de Caudales 54
- Figura 3.17** Grupos de metodologías para el cálculo de caudales ecológicos 58
- Figura 3.18** Actividades de la etapa IV del procedimiento 64
- Figura 3.19** Simulación de un curso con el modelo HEC-Ras, donde se muestra la sección y el gráfico del perímetro mojado con el punto de inflexión 67
- Figura 3.20** Curva que relaciona el perímetro mojado con el caudal en una sección de un río 68
- Figura 3.21** Perfil longitudinal de un río con diferentes niveles de agua, respecto a la profundidad mínima requerida por la biota 68
- Figura 3.22** Actividades de la etapa V del procedimiento 76

1.

Introducción

Antecedentes

Los proyectos de aprovechamiento de recursos hídricos con embalses, si bien han sido siempre fundamentales para el desarrollo humano, han cobrado mayor importancia en las últimas décadas debido a que se consideran como medidas de adaptación al cambio climático. No cabe duda del beneficio que conlleva este tipo de proyectos, que permiten la provisión de agua, ya sea para consumo humano, riego o generación hidroeléctrica. Sin embargo, también suelen producir efectos negativos relacionados con la modificación del régimen hídrico de los ríos en cantidad y calidad, que ocasionan una degradación generalizada de ecosistemas acuáticos, que, a su vez, generan impactos de tipo ambiental y socioeconómico. De ahí la necesidad de considerar los caudales ecológicos cuando se proyecta el aprovechamiento de recursos hídricos con presas, ya que dichos caudales se constituirán en un usuario más del embalse, un usuario que responderá a las necesidades del hábitat para el mantenimiento de los ecosistemas cuyo motor es el agua.

Conforme a la bibliografía consultada, existen más de 280 métodos para el cálculo de caudales ecológicos, lo cual prueba la importancia de su establecimiento y la gran cantidad de variables que intervienen en su determinación: características propias del proyecto, su ubicación respecto a la cuenca (que tiene características particulares) y, principalmente, la biodiversidad presente en el río y las zonas adyacentes, que es específica y difícilmente se podría llegar a clasificar en grupos reducidos si se considera la infinidad de entornos geográficos y ecológicos en los que se requiere intervenir.

En este contexto, la Guía presenta un procedimiento para el estudio de caudales ecológicos, que permite alcanzar un conocimiento claro de su importancia en circunstancias específicas y dirige al evaluador al grupo de metodologías más adecuadas para su cálculo a fin de garantizar caudales mínimos en cantidad, calidad y régimen, que permitan conservar la biodiversidad.

Objetivos

El objetivo general de la Guía es proporcionar criterios para elaborar estudios de caudales ecológicos en proyectos de riego, abastecimiento urbano y generación hidroeléctrica. Sus objetivos específicos son:

- Proporcionar elementos que permitan generar una línea de base del estado físico ambiental del área de estudio y de influencia del proyecto.
- Facilitar la predicción y evaluación del impacto potencial del proyecto de aprovechamiento de recursos hídricos que estaría ocasionando la alteración de caudales en el ecosistema.
- Proveer criterios para seleccionar el método o los métodos más adecuados para calcular los caudales ecológicos.
- Establecer criterios para la verificación de los caudales ecológicos respecto al manejo del embalse.

Definiciones importantes

Caudal ecológico: es la calidad, cantidad y régimen del flujo o variación de los niveles de agua requeridos para mantener los componentes, funciones y procesos de los ecosistemas acuáticos.

Caudal ambiental: es la cantidad, calidad y régimen de los caudales necesarios para mantener ecosistemas de agua dulce y de estuario, así como el sustento y bienestar humano que dependen de dichos ecosistemas.

Servicios ambientales: son aquellos beneficios que proveen los ecosistemas a los seres humanos quienes, a su vez, hacen uso de ellos con el fin de mejorar su calidad de vida. Los ecosistemas proporcionan a la sociedad una amplia gama de servicios para su subsistencia. Los beneficios de dichos servicios pueden clasificarse de distintas formas. Por ejemplo, atendiendo a la relación entre el ecosistema y la provisión del servicio, esos beneficios pueden ser de dos tipos:

- Directos, los cuales incluyen la producción de agua o alimentos (servicios de aprovisionamiento), la regulación de ciclos hídricos o degradación de los suelos, de plagas y enfermedades (servicios de regulación).
- Indirectos, los cuales se relacionan con el funcionamiento de procesos del ecosistema que generan los servicios directos, como el de fotosíntesis y el ciclo de nutrientes, entre otros. Estos servicios otorgados por dichos ecosistemas, tales como el control de la erosión, el mantenimiento de los cauces de los ríos y el secuestro de carbono, son denominados servicios ambientales.

Consideraciones generales

Esta Guía no pretende sustituir las normativas vigentes en los diferentes países, sino proporcionar una herramienta adicional que permita elaborar estudios de caudales ecológicos en función de las características de los sitios a intervenir y de los diferentes tipos de proyectos a implementar. Lo expuesto se sustenta en la gran diversidad de ecosistemas por región geográfica y climática y en las características propias de cada proyecto de aprovechamiento, lo que, en conjunto, representa una amplia gama de escenarios que no es posible sistematizar.

La Guía se circunscribe a los requerimientos de caudales mínimos para mantener la biodiversidad en un entorno específico y no abarca requerimientos humanos, ya sean los particulares del proyecto (riego, abastecimiento humano, generación de energía), los de otros usos o los usos existentes aguas abajo de la presa (recreación, pesca, riego menor, abrevadero, uso cultural, etc.), los cuales se constituyen en usuarios establecidos del embalse y además son fácilmente cuantificables. Por tanto, en lo referente a servicios ambientales, la Guía considera aquellos caudales que mantienen el ecosistema y que los seres humanos requieren para la preservación del agua como recurso.

Los proyectos que considera la metodología se dividen en dos grupos: proyectos de abastecimiento urbano y riego, y proyectos de generación hidroeléctrica. La principal diferencia radica en que, en los proyectos hidroeléctricos, se restituye al curso el caudal empleado para generar energía.

El procedimiento para la determinación de la metodología más adecuada de cálculo de caudales ecológicos considera el impacto del proyecto en el medioambiente dependiente del agua y su régimen, y la forma más apropiada de mitigarlo, con caudales ecológicos acordes con el objetivo de preservación.

La información básica que requiere el estudio de caudales ecológicos se genera en el proyecto de ingeniería y el estudio ambiental correspondiente, los cuales se desarrollan de forma paralela. Por tanto, el estudio de caudales ecológicos debe acompañar a los mismos, tanto en el empleo de información como en la planificación hidráulica del sistema. No obstante, se puede requerir información complementaria en función del método a aplicar y su complejidad.

La aplicación de la Guía debe ser realizada por especialistas en hidrología e hidráulica y un especialista en el área biótica.

Enfoque

El enfoque de la Guía es sistémico, en consideración a la integralidad de factores que componen el análisis de los caudales ecológicos. Es fundamental el componente biótico-físico para el establecimiento de caudales ambientales, pero también la forma de aprovechamiento del recurso hídrico.

Contenido de la guía

Además de este primer capítulo introductorio, la guía está estructurada de la siguiente manera:

- Capítulo 2, centrado en los impactos generados por proyectos de aprovechamiento hídrico con embalses. Este capítulo tiene por objeto proporcionar información básica sobre los impactos que generan los proyectos que contemplan embalses para la regulación del agua, desde los procesos que se dan en el propio embalse y que afectan la calidad del agua hasta los efectos que se producen aguas abajo por el cambio en la cantidad, calidad y régimen de caudales en el curso natural. La información que contiene el capítulo permite desarrollar con claridad las actividades que considera la metodología.
- Capítulos 3 a 7, que constituyen la guía propiamente dicha. Contienen el procedimiento para el estudio y la determinación de caudales ecológicos, que se desarrolla en cinco etapas, mostradas en la figura 1.1 y descritas a continuación.
 - Etapa I: Descripción del proyecto. Considera la descripción de todos los componentes del proyecto, las obras civiles y las reglas de operación preliminares.
 - Etapa II: Caracterización del sistema hídrico. Contempla la generación de información básica, que incluye: i) la definición del área a estudiar, ii) la caracterización física (hidrológica, morfológica del río, calidad del agua); iii) la caracterización ecológica (ecosistemas acuáticos, ribereños, servicios ambientales), y iv) la caracterización antrópica.
 - Etapa III: Procedimiento de selección de la metodología de cálculo de caudales ecológicos. Incluye los pasos para llegar a establecer la mejor metodología para la determinación de caudales ecológicos, basándose en la importancia del proyecto respecto al entorno físico y a la importancia ambiental del área estudiada, que, en general, representa la alteración del sistema hídrico por el proyecto.

- Etapa IV: Metodologías para el cálculo de caudales ecológicos. En esta etapa, una vez definido el grupo de métodos que se pueden emplear, se realizan precisiones sobre sus características, limitaciones, información requerida y aplicación. Asimismo, se plantean, en líneas generales, los requerimientos particulares de los métodos relacionados con la definición del tramo en estudio, las especies indicadoras, trabajos adicionales de campo y los criterios para el cálculo de los caudales ecológicos.
- Etapa V: Verificación de los caudales ecológicos. Considera el análisis de los caudales ecológicos determinados respecto a las reglas de operación del embalse y las características de los caudales en cuanto a cantidad, régimen (variación del caudal respecto a la época del año) y calidad del agua regulada; es decir, se incorpora en los análisis la situación con proyecto. En esta fase, se definen los caudales ecológicos a emplear en el proyecto.

Figura 1.1
Esquema de la Guía

Fuente: Elaboración propia



2.

Impactos generados por proyectos de aprovechamiento hídrico con embalses

Introducción

Los proyectos de aprovechamiento de recursos hídricos que emplean embalses como mecanismo de regulación del agua, generan una serie de efectos, tanto en el régimen de las aguas como en su cantidad y calidad, durante la fase de llenado del embalse y su operación. El conocimiento de los efectos mencionados es de suma importancia puesto que constituye una herramienta para establecer cuáles serían los impactos que podría generar un proyecto determinado y servirá para realizar una mejor evaluación de los parámetros que considera el procedimiento para el estudio y la determinación de caudales ecológicos, los cuales forman parte de las medidas de mitigación del proyecto.

Los proyectos que considera la guía están compuestos fundamentalmente por la presa, las obras de captación y conducción y, en función del tipo de proyecto, otros elementos adicionales. Los impactos que se explican en el presente capítulo consideran de forma genérica dos zonas delimitadas por la presa: la primera zona comprende el embalse y la segunda, el río y áreas adyacentes, aguas abajo de la presa.

Tipos de proyectos de aprovechamiento hídrico

En el presente estudio se consideran tres tipos de aprovechamiento del recurso agua, a través de obras de regulación (presas):

- Proyectos de generación hidroeléctrica, caracterizados por mantener un nivel de agua en el embalse relativamente constante y realizar frecuentes descargas con variaciones bruscas de caudal.
- Proyectos de riego, caracterizados por tener fuertes oscilaciones estacionales del nivel de las aguas del embalse y realizar descargas altas en los meses de estiaje y sueltas menores en época húmeda.
- Proyectos de abastecimiento humano, caracterizados por tener una conducción cerrada del embalse al centro de consumo, por lo que el cauce aguas abajo se queda con unos caudales circulantes muy reducidos.

También pueden presentarse proyectos multipropósito, que combinen diferentes aprovechamientos. Sin embargo, para la guía, los tres tipos de proyectos se aglutinan en dos grupos, en función de los impactos que generan: i) proyectos de riego y abastecimiento humano, que son de uso consuntivo, y ii) proyectos hidroeléctricos, que restituyen los caudales turbinados al río.

Impactos que generan los proyectos de aprovechamiento hídrico con embalses

Los impactos que ocasionan los proyectos de aprovechamiento de recursos hídricos a través de la regulación del agua con embalses se resumen en la figura 2.1.

Las alteraciones hidrológicas y geomorfológicas generadas en el curso natural y las áreas adyacentes provocan impactos biológicos de diferente intensidad, dependiendo del grado de intervención que conlleve el proyecto y de la riqueza biótica de la zona en estudio. En algunos casos, los impactos mencionados tienen implicancias socioeconómicas, debido a que el río puede ser utilizado para actividades como, por ejemplo, pesca comercial o de subsistencia, o tener otros aprovechamientos.

Figura 2.1
Impactos que ocasionan los proyectos con embalses

Fuente: Elaboración propia, en base a Ponencia La regulación de los caudales y su efecto en la biodiversidad, Diego García de Jalón, Universidad Politécnica de Madrid, Expo Zaragoza, 2008



Para establecer los impactos específicos y su magnitud, ya sea de forma cuantitativa o cualitativa, es fundamental conocer los procesos que se van a generar en el embalse (durante el llenado y su operación) y los impactos genéricos que se presentarán aguas abajo por modificaciones en la calidad del agua y el cambio de régimen, que va ligado a las reglas de operación del embalse, que, a su vez, obedecen al tipo de proyecto a implementar.

Descripción de los procesos que se generan en los embalses

En los embalses, se produce una compleja interacción entre los organismos y su ambiente físico-químico, con características dinámicas debido a la acción del clima y a los efectos producidos por el manejo de las aguas. Es así como los organismos se constituyen en el centro del sistema, que

se ve afectado por los flujos de energía y masa y fuerzas meteorológicas, que ocasionan en conjunto nuevos estados de organización.

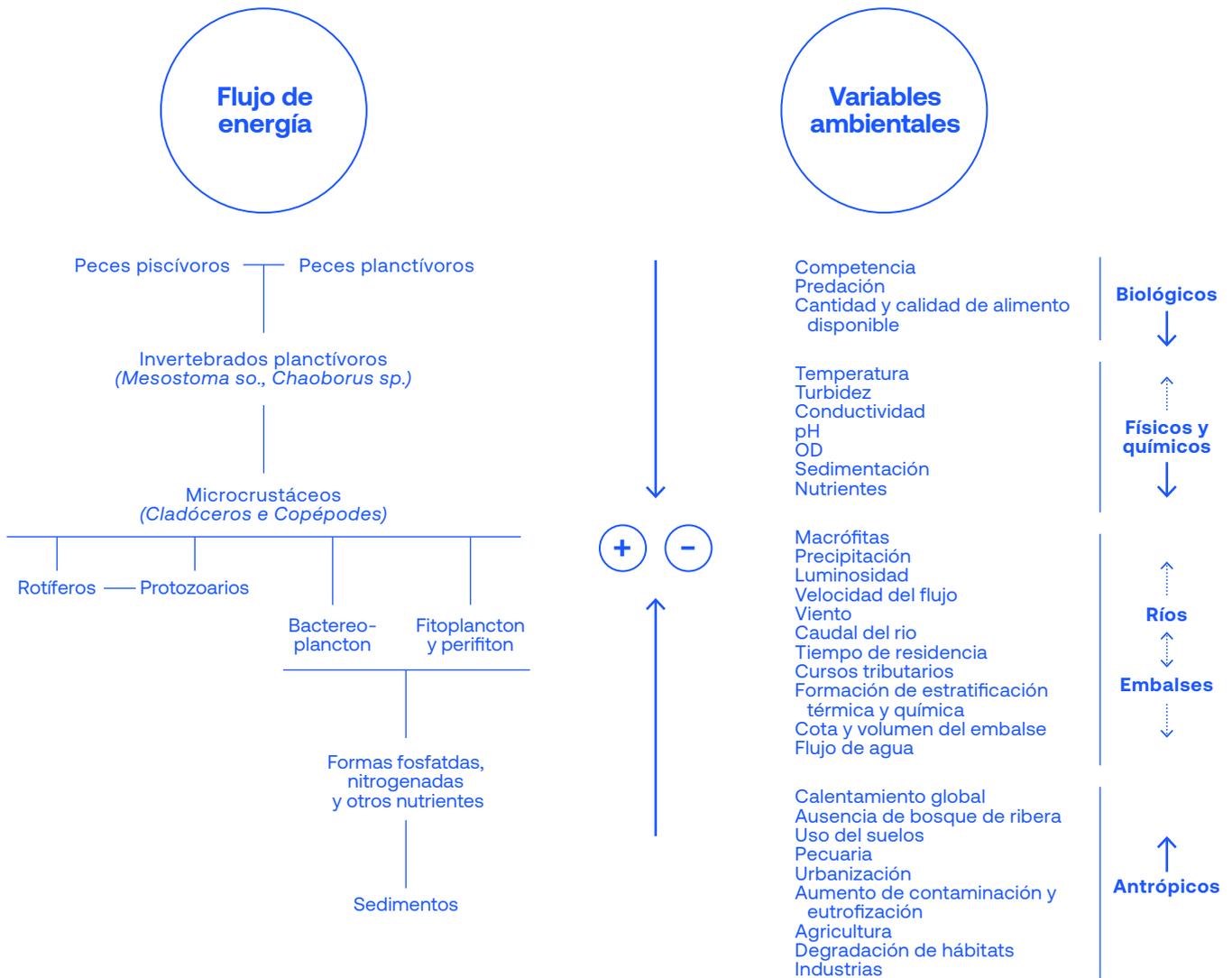
La organización espacial de los embalses es heterogénea, característica que genera variaciones en las condiciones físicas y químicas del agua y modificaciones de estas en sentido horizontal y vertical, ambas producidas por la estratificación hidráulica, el transporte de sedimentos, las interacciones agua-sedimento, el sistema de transporte vertical y horizontal, la composición, diversidad y estructura de las comunidades biológicas y el tiempo de residencia.

Los embalses presentan un régimen hidrodinámico intermedio entre los sistemas lóticos (ríos) y o lénticos (lagos), que ocasionan alteraciones en el régimen hidrológico y en la dinámica de los ríos con implicancias directas en el ecosistema acuático principalmente.

Figura 2.2

Esquema simplificado de una cadena acuática, destacando la dirección del flujo de energía y las variables ambientales que actúan sobre la estructura y la dinámica del sistema

Fuente: Serafim-Junior et. al (2011)



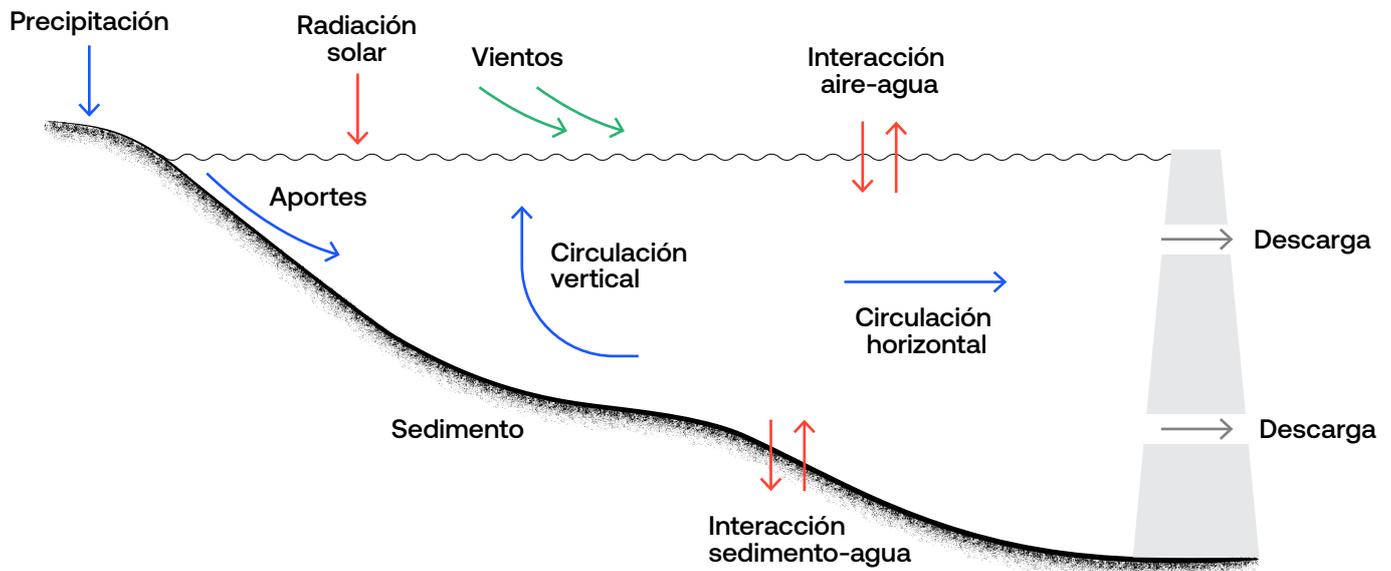
En general, se pueden distinguir tres sectores en un embalse: i) uno con características próximas a las de río, ubicado en la parte alta del embalse; ii) otro con características de un ambiente lacustre, próximo a la presa, y iii) una zona de transición entre los dos ambientes señalados anteriormente. El sector fluvial presenta mayor velocidad de flujo y, por tanto, menor tiempo de retención, menor penetración de luz y mayor concentración de material en suspensión y de nutrientes, siendo la mayor parte de la producción autóctona; el sector lacustre posee características opuestas a las del fluvial y el de transición presenta características intermedias. Respecto al tiempo de residencia, si este es menor, la tendencia del embalse a comportarse como río es mayor; si el tiempo de residencia es mayor, el embalse presenta características lacustres.

El movimiento del agua en los embalses, tanto horizontal como vertical, está relacionado con:

- La circulación de agua originada por los afluentes al embalse y por los caudales de salida de la presa para cubrir demandas.
- Las corrientes superficiales generadas por los vientos, que provocan una circulación a gran escala y cierta turbulencia por la acción de las olas.
- Las corrientes de densidad que se producen en el interior de los embalses con estratificación térmica.
- Los procesos de intercambio de calor en la superficie del embalse, que tienen una influencia en el desarrollo de la termoclina y sobre los procesos de intercambio vertical,

Figura 2.3
Esquema con los principales compartimientos y vectores de flujos, y cambios entre los compartimientos de los embalses

Fuente: Tundisi (1999), citado en (Moacyr, s.f.)



que ocasionan la expansión y contracción del cuerpo de agua y las pérdidas por evaporación.

- La radiación solar que penetra la superficie, causa el calentamiento de las capas internas del embalse y afecta la circulación por la generación de barreras térmicas.

La figura 2.3 muestra de forma esquemática el movimiento del agua en el embalse y su relación con factores hidroclimáticos.

Las variaciones climáticas estacionales, sumadas al manejo de los embalses, generan también gradientes horizontales y verticales en los mismos, siendo los verticales los de mayor importancia debido a las corrientes de transporte que se distribuyen en las diferentes profundidades en respuesta a la estratificación producida por la entrada de agua más densa y fría de los afluentes al embalse (Moacyr, s.f.).

La temperatura del agua, el pH, la conductividad, el oxígeno disuelto, la turbidez y los sólidos en suspensión son las propiedades que más se alteran entre las estaciones del año, sobre todo, en zonas tropicales. Los embalses suelen ganar calor en los períodos calientes (diarios o anuales) y lo pierden en los períodos más fríos; la temperatura y el oxígeno disuelto tienden a reducirse por el calentamiento durante el día y aumentar por el enfriamiento durante las noches. Con el incremento de las lluvias, el pH tiende a subir y acercarse a la neutralidad, debido a la mayor dilución de los compuestos que contiene y un escurrimiento más rápido, ocasionado por el aumento del volumen de agua, que hace que la acidez de la misma disminuya (Moacyr, s.f.).

La sectorización de los embalses genera cambios en la calidad del agua; por ejemplo, la falta de oxígeno en el agua (anoxia) puede presentarse en sectores con circulación reducida debido a la acumulación de material biológico en descomposición. Por tanto, las características del embalse condicionarán la calidad del agua que es desfogada para diferentes usos. Nótese que, generalmente, la obra de toma se encuentra en la parte inferior de las presas, coincidente con la zona del hipolimnion del embalse (véase acápite 2.3.1.2), donde el agua puede encontrarse afectada por el nivel trófico del embalse (eutrofia u oligotrofia) y por su estratificación térmica.

Eutrofización

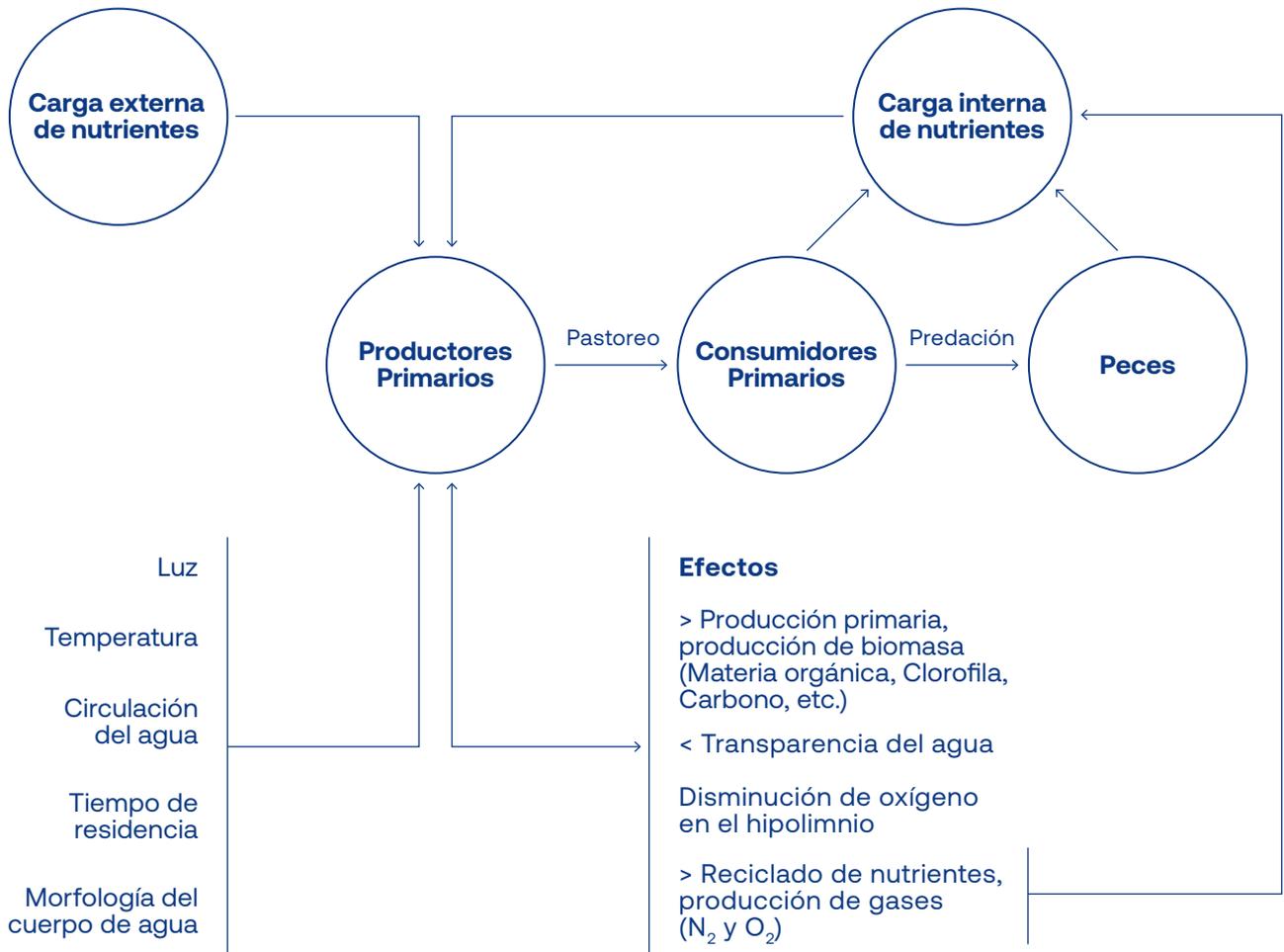
La eutrofización representa un proceso natural o artificial de adición de nutrientes a los cuerpos de agua y sus efectos. No es un sinónimo de contaminación.

Las principales causas de la eutrofización artificial están ligadas a actividades antrópicas, relacionadas con la ocupación y uso del suelo no planificados, que generan el ingreso de aguas residuales domésticas e industriales, el lavado de aguas contaminadas con fertilizantes utilizados en la agricultura y que contienen nitrógeno y fósforo aplicados en el suelo, así como el ingreso de residuos orgánicos de la ganadería y la deforestación en un lago o un embalse. La eutrofización artificial podría presentarse en la fase de operación de un embalse, mientras que, durante la fase de llenado del embalse, se daría una

Figura 2.4

Cambios físicos, químicos y biológicos en la calidad del agua, causados por el proceso de eutrofización

Fuente: Trabajo Práctico No. 1, Cátedra de Protección y Conservación de la Naturaleza, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata (<http://www.fcnym.unlp.edu.ar/catedras/proteccion/tp1/tp1.pdf>, enlace consultado 16/04/2019)



eutrofización debido a la descomposición de la biomasa presente en el vaso.

Los cambios físicos, químicos y biológicos en la calidad del agua causados por la eutrofización se muestran en la figura 2.4.

Los efectos de la eutrofización de embalses son los siguientes:

● En la biodiversidad:

- Reducción de los ecosistemas acuáticos, alterando directamente el componente biótico con el aumento de la biomasa de algas, floraciones de cianobacterias y macrófitas acuáticas, alteraciones en la estructura de todas las comunidades acuáticas, reducción de las concentraciones de oxígeno disuelto, formación de gas sulfhídrico y mortandades masivas de peces.

- Crecimiento de algas filamentosas que reducen la penetración de la luz en el agua, lo que, a su vez, impide el crecimiento de macrófitas sumergidas y con hojas fluctuantes. Las macrófitas emergentes pueden ver su densidad reducida debido a que la disminución de luminosidad perjudica el desarrollo de brotes nuevos.

- Aumento de la producción primaria, que, a su vez, deriva en un aumento considerable de los productores secundarios. Al igual que ocurre con el fitoplancton, los productores secundarios, especialmente zooplancton y peces, muestran cambios en su composición específica y en la densidad de cada especie, efectos que pueden conducir a una pérdida de la biodiversidad.

● En la salud humana:

- Posibles irritaciones de piel y dermatitis provocadas por el aumento del pH del agua y por la presencia de cianobacterias dermatotóxicas.

Cuadro 2.1

Valores del índice del estado trófico clasificados en función del estado trófico

Fuente: Curso: Calidad de Agua en Embalses, Agencia Nacional de Aguas, "Unidad 2: Calidad de agua en Embalses". (Moacyr, s.f.)

Valor del IET	Clases de estado trófico	Características
= 47	Ultraoligotrófico	Cuerpos de agua limpios, de productividad muy baja y concentraciones insignificantes de nutrientes que no acarrearán perjuicios para los usos del agua.
47<IET=52	Oligotrófico	Cuerpos de agua limpios, de baja productividad, en los que no ocurren interferencias indeseables sobre los usos del agua, derivados de la presencia de nutrientes.
52<IET=59	Mesotrófico	Cuerpos de agua con productividad intermedia, con posibles implicaciones sobre la calidad del agua, pero en niveles aceptables en la mayoría de los casos.
59<IET=63	Eutrófico	Cuerpos de agua con alta productividad en relación a las condiciones naturales, con reducción de la transparencia, en general afectados por actividades antrópicas y en los cuales ocurren alteraciones indeseables en la calidad del agua, derivadas del aumento de concentración de nutrientes o interferencias en sus múltiples usos.
63<IET=67	Supereutrófico	Cuerpos de agua con alta productividad en relación a las condiciones naturales, de baja transparencia, en general afectados por actividades antrópicas, en los cuales ocurren con frecuencia alteraciones indeseables en la calidad del agua, como el acontecimiento de episodios de floraciones de algas, e interferencias en sus múltiples usos.
>67	Hipereutrófico	Cuerpos de agua afectados significativamente por las elevadas concentraciones de materia orgánica y nutrientes, con compromiso acentuado de sus usos, asociado a episodios de floraciones de algas o mortandades de peces, con consecuencias indeseables para sus múltiples usos, inclusive sobre las actividades pecuarias en las regiones ribereñas.

- Posibles brotes de gastroenteritis, parálisis de los músculos respiratorios, diarrea, daños al hígado y los riñones si es consumida el agua bajo efectos de la eutrofización.

El grado de eutrofia del embalse depende de los vertidos orgánicos y de escorrentías ricas en nutrientes de la cuenca del embalse. Sus efectos se hacen más notables en embalses con tiempos de retención grandes y se manifiestan con mayor intensidad en la fase de llenado del embalse, cuando la descomposición de materia orgánica es muy elevada, pudiendo ser menor en la fase de llenado si se controlan los vertidos hacia el embalse.

Los niveles de estado trófico se pueden medir a través del índice del estado trófico (IET), que tiene por objeto clasificar los cuerpos de agua en diferentes grados de eutrofia en función del aumento de nutrientes y sus efectos, relacionados con el crecimiento excesivo de las algas, o el aumento de la infestación de macrófitas acuáticas. El IET se calcula a partir de los valores de fósforo, que proporcionan una medida del potencial de eutrofización ya que este nutriente actúa como el agente que ocasiona el proceso.

En embalses, la Agencia Nacional de Aguas de Brasil, propone la misma clasificación adoptada por la Compañía de Tecnología de Saneamiento Ambiental (CETESB), donde el cálculo del IET es realizado a partir de los valores de fósforo a través de la fórmula siguiente: $IET = 10 * (6 - (1,770,42 \cdot (\ln.PT) / \ln 2))$, donde el fósforo total (PT) es expresado en $\mu\text{g/L}$ (Moacyr, s.f.).

El cuadro 2.1 muestra una clasificación de índices de estado trófico característicos empleados en Brasil.

Es posible considerar también otras referencias del índice de Carlson, que muestran que IET menores de 30 indicarían un estado ultraoligotrófico; IET entre 30-44, estado oligotrófico; IET entre 44-54, estado mesotrófico; IET entre 54-74, estado eutrófico, e IET mayores a 74, estado hipereutrófico (López Martínez y Madroñero Palacios, 2015).

Lo anteriormente expuesto se aplica principalmente a embalses ya en funcionamiento. Sin embargo, en la fase de proyecto, es muy importante inferir el efecto de la eutrofización derivada de la fase de llenado del embalse e incluso de la fase de operación a través de modelos de calidad debido a que se debe garantizar la calidad del agua que será descargada para el requerimiento ecológico.

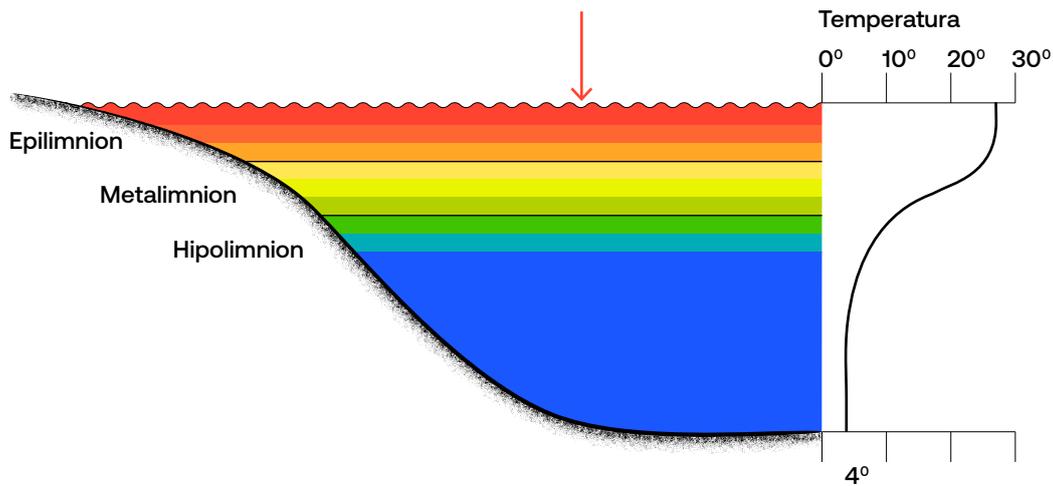
Estratificación térmica, química e hidráulica

La estratificación en un embalse es la propiedad que tienen las aguas de ordenarse en capas verticales según su densidad, la cual se ve afectada por las variaciones térmicas, las químicas (concentración de sólidos disueltos y sólidos en suspensión) o por ambas.

La estratificación de un embalse se presenta: i) en los climas templados y cálidos, durante las épocas cálidas en que se calienta la superficie y el fondo se mantiene

Figura 2.5 Estratificación térmica de un lago o embalse

Fuente: Blog de Geografía (2013) <https://vallca.wordpress.com/2013/02/05/la-temperatura-de-un-lago-y-sus-capas/>



frío, ii) en latitudes frías, durante el invierno, cuando hielan las capas superficiales, mientras que las profundas están más calientes. El periodo de mezcla es durante el verano. La estratificación térmica es más común en embalses profundos, mientras que aquellos con poca profundidad no tienen estratificaciones marcadas. Los embalses eutróficos, cuando están estratificados, pueden ocasionar grandes mortandades en el tramo de aguas abajo de la presa.

La estratificación térmica en un embalse presenta, en general, tres zonas, representadas en la figura 2.5:

- Epilimnion, zona superficial de mayor temperatura y menor densidad debido al contacto directo de la radiación solar, que registra temperaturas elevadas de forma progresiva según avanza la primavera y el verano.
- Metalimnion, zona intermedia (incluye la termoclina, que divide las dos masas de agua de temperaturas diferentes y constituye el punto de inflexión del perfil de temperaturas, a partir del cual se produce un descenso brusco de la misma).
- Hipolimnion, zona profunda, de menor temperatura y mayor densidad.

La estratificación generalmente es el resultado del balance de calor entre el agua almacenada y las contribuciones externas, que incluyen la radiación solar y atmosférica, el cambio conductivo de calor entre la atmósfera y el agua, y el flujo líquido de calor de los tributarios al embalse. También influyen el viento y las precipitaciones, principalmente en zonas tropicales (Moacyr, s.f.).

La estratificación térmica suele producirse por una estratificación hidráulica generada por el flujo unidireccional predominante y por la altura de salida del

agua. En un embalse, la toma de las aguas puede realizarse en función del aprovechamiento: i) de la superficie, fluyendo sobre la cresta del embalse; ii) del fondo, por descargas de fondo, y iii) por medio de la toma de agua hacia las turbinas. Esto produce una estratificación térmica y de densidad muy acentuada, semejante al proceso natural. En este caso, ocurre también la acumulación de sustancias reductoras y la desoxigenación del hipolimnion.

Esta estratificación hidráulica es característica de embalses profundos, empleados comúnmente para generar energía. En estos casos, existe una estratificación térmica y química vertical que no se relaciona específicamente con los procesos de interacción climatológica o hidrográfica, sino con la altura de la salida del agua hacia las turbinas en diferentes profundidades. El aumento de H₂S (ácido sulfhídrico) y la anoxia son dos consecuencias importantes de la estratificación hidráulica.

La estratificación y desestratificación térmica generan alteraciones físicas y químicas en el agua, presentándose una distribución vertical de nutrientes, con acumulación de sustancias y elementos químicos en el hipolimnion durante la estratificación, y concentraciones verticales más homogéneas en la columna de agua o precipitación y recirculación total. La permanencia o no de la estratificación térmica en lagos profundos de la región tropical determina que a esta se superpongan las estratificaciones químicas y biológicas. Habrá, además, incidencia de gradientes verticales decrecientes de oxígeno disuelto, con hipolimnion permanentemente anaeróbico y con altas concentraciones de hierro y gas sulfhídrico. Los nutrientes resultantes del proceso de descomposición de la materia orgánica permanecen en el hipolimnion, retornando de forma muy lenta al epilimnion por el mecanismo de la difusión molecular. Por tanto, podrá haber un empobrecimiento de la zona eufótica

por la falta de nutrientes para las algas, lo cual indica que la calidad del agua del epilimnion es diferente de la del hipolimnion, con la correspondiente estratificación de las comunidades que los habitan (PORTO et al., 1991, c/f Curso: Calidad de Agua en Embalses, Agencia Nacional de Aguas, Unidad 2: Calidad de agua en Embalses).

Cambios que se generan aguas abajo de los embalses

Los efectos de un embalse aguas abajo dependen de las características de fragilidad, estabilidad y nivel de complejidad del ecosistema fluvial afectado y del manejo del embalse según el tipo de proyecto. Los impactos de regulación en un río sometido a algún proceso de degradación podrían ser menores a los que la misma regulación causaría en un río bien conservado; por tanto, se podría decir que los impactos serán menores cuanto mayor sea el nivel de deterioro.

Un embalse, al constituirse en un obstáculo para el paso de sedimentos que el río transporta, no solo cambia el régimen de las aguas que descarga aguas abajo, sino que rompe el equilibrio geomorfológico del cauce; inicialmente, esto ocurre en los tramos próximos a la presa, pero, a medio y a largo plazo, en tramos más alejados de la presa, puede llegar a afectar a cursos mayores, a los deltas e incluso a las zonas costeras. Las aguas del embalse descargadas sin sedimentos desarrollan una alta capacidad erosiva, ocasionando la profundización del cauce y el acorazamiento de su sustrato, cambios que ocasionan su desequilibrio y que afectarán a las comunidades que habitan en el cauce y sus márgenes.

En los ríos de alta montaña, los regímenes de temperatura de las aguas y de caudales están ligados a la estacionalidad climática y al régimen de precipitaciones, por lo que fluctúan grandemente de forma natural; en tramos bajos, las aguas proceden de una cuenca mayor con características heterogéneas por lo que, en general, sus regímenes térmicos y de caudales tienen fluctuaciones mucho más leves. Por tanto, en función de la parte de la cuenca donde se localice la presa, se tendrá un impacto diferente, con un periodo de adaptación al nuevo equilibrio geomorfológico de duración variable.

La respuesta de la comunidad biológica fluvial a la regulación de caudales dependerá de su composición, si predominan especies de gran sensibilidad a los cambios en el medio en el que viven, si tienen límites de tolerancia estrechos o si se trata de comunidades bien estructuradas y con diversidad alta. Estas comunidades fluviales también se distribuyen a lo largo del río siguiendo un gradiente altitudinal continuo o zonación, cuya diferente composición y estructura origina respuestas distintas a la regulación; un aspecto fundamental es que el embalse causa una discontinuidad en la distribución de las comunidades.

Factores a considerar para evaluar los impactos aguas abajo de los embalses

Al evaluar los posibles impactos de cualquier aprovechamiento hídrico, es necesario considerar que estos dependen del tipo de proyecto, del sitio de implementación y del manejo del embalse. La regulación del embalse repercutirá directamente en el ecosistema fluvial, los principales factores que lo afectarán son:

- El régimen de caudales que el embalse descarga.
- El régimen térmico de las aguas desfogadas.
- La calidad físico-química y biológica de las aguas descargadas.

En general, el funcionamiento de los embalses, según el tipo de aprovechamiento y manejo, desencadenará ciertas características o comportamientos específicos de los factores indicados, que deberán ser analizados y valorados para evaluar la magnitud de los impactos que se presentarán aguas abajo del embalse.

Regímenes de caudales originados por embalses y su manejo

Según el tipo de proyecto y la forma de operación del embalse, se podrían generar los siguientes efectos:

- Reducción de caudales respecto al régimen natural. La superficie acuática del cauce (perímetros mojados) disminuirá y, por lo tanto, su producción absoluta. La mayoría de las especies animales que habitan en el río están acondicionadas a algún tipo de velocidad de las aguas mediante adaptaciones de sus mecanismos de alimentación, sus medios de locomoción y sustentación en la corriente o su fisiología. Si se considera que en un río pueden existir especies reófilas, que predominan en los rápidos, y otras especies propias de aguas con movimiento lento o quietas que habitan en las orillas, pozas y remansos, el efecto de la reducción de caudales será negativo para las especies reófilas ya que verán disminuidas tanto la profundidad del agua como la velocidad de flujo que permite su movilidad; por el contrario, las desventajas podrían ser menores para las especies lénticas, aunque también se debe tener en cuenta la fase de desarrollo en la que se encuentran los peces. El lavado de material debido al nuevo régimen de aguas claras ocasionará la homogeneización de los microhábitats del fondo y el relleno de sedimentos en el medio intersticial, por lo que muchas especies del macrobentos desaparecerán y se malograrán los frezaderos o sitios de desove (García de Jalón, s.f.).
- Incremento de caudales circulantes. En proyectos hidroeléctricos, se produce una inestabilidad del cauce con posible erosión del fondo y las orillas en el tramo

de influencia de las descargas de restitución, lo cual afectará a la producción de los organismos bentónicos. Asimismo, la turbiedad generada por la erosión del cauce limitará la producción primaria, la cual, a su vez, podría perjudicar a macrófitas y peces. El aumento de caudales podría favorecer a las especies reófilas; sin embargo, las especies lénticas se verían afectadas al ser arrastradas de su hábitat o limitadas para realizar sus funciones vitales (García de Jalón, s.f.).

- Variaciones de descargas de caudales. La operación del embalse modifica el régimen de crecidas, disminuyendo su intensidad y frecuencia y favoreciendo la estabilidad del cauce, que posiblemente estaba sujeto a inundaciones o al incremento de su perímetro mojado en época de lluvias. Lo expuesto favorece el establecimiento de una vegetación ribereña, que genera nuevos hábitats, que pudieran ser favorables o desfavorables a las especies acuáticas habituadas a otro entorno, principalmente a las nativas (García de Jalón, s.f.).
- La retención del material de arrastre en el embalse. Esto hace que las aguas desfogadas se consideren claras, sin sedimento, lo cual generará, como se mencionó anteriormente, mayor erosión y acorazamiento del lecho del río.
- En lo que respecta a la biodiversidad, la reducción en la turbidez del agua favorecerá un mayor desarrollo tanto del perifiton como de la vegetación macrofítica sumergida, al estabilizarse el sustrato en que vegetan. El macrobentos suele aumentar cuantitativamente, pero su diversidad se ve notablemente disminuida ya que la estabilidad favorece la dominancia de aquellas especies mejor dotadas para vivir en esas condiciones concretas, en detrimento de otros taxones que dejan de ser competitivos. Lo expuesto está condicionado a la altura de evacuación de los caudales del embalse para cubrir demandas y se cumple generalmente cuando la obra de toma es elevada o intermedia ya que si la salida es alta, existirá una capa de agua fría por debajo de ese nivel y se evacuará agua más caliente; por tanto, habrá una mayor retención de nutrientes y de materia orgánica en descomposición y la tendencia a una anoxia permanente en el fondo. Si la salida es intermedia, tanto la fotosíntesis como la respiración serán bajas, existirá una mezcla de las masas de agua y la capa anóxica será menor. Finalmente, si la salida es baja, el agua desfogada podrá contener algo de sedimentos y nutrientes.
- El acorazamiento del cauce, generado por el depósito de material fino entre el sustrato del lecho del río, que colmata el medio intersticial formado por gravas, cantos y rocas, ocasiona la pérdida de su capacidad biogénica. El medio intersticial es fundamental para la mayoría de las especies animales del río, pues les sirve como depósito seguro de sus huevos y como refugio y criadero para sus larvas y alevines (Diego García de Jalón, s.f.).

- Oscilaciones bruscas en las descargas. Se presentan generalmente en aprovechamientos hidroeléctricos debido a las variaciones en las demandas, pudiendo descargarse desde los caudales máximos aprovechados hasta los mínimos permitidos. Esta oscilación, en función del tipo de turbinas, puede realizarse incluso en menos de un minuto. Las oscilaciones bruscas de caudales provocan que la mayoría de las especies de macroinvertebrados sean arrastradas al aumentar los caudales y que otros organismos acuáticos se queden en áreas secas, sin humedad ni flujo. La biodiversidad del río llega a reducirse a especies tolerantes a fuertes corrientes en el centro del cauce, que sean capaces de desplazarse rápidamente a posiciones de refugio frente a la corriente o que puedan sobrevivir en las orillas en los periodos sin descargas o descargas bajas. Como resultado, la comunidad macrobéntica queda rápidamente empobrecida en densidad, riqueza faunística y diversidad.
- La velocidad del flujo generará una perturbación general de las especies que habitan el río (macroinvertebrados bentónicos, especies reófilas y lénticas), pudiendo sobrevivir principalmente las especies generalistas que pueden adaptarse a regímenes rápidos y lentos, como los quironómidos y oligoquetos.
- Respecto a los peces, las variaciones de caudales originan cambios en las profundidades de flujo y la velocidad, situación que los afecta principalmente al inhibir su reproducción. Las especies piscícolas que habitan los ríos, tanto en sus tramos de montaña como de pie de monte (truchas, barbos, bogas, cachos, etc.), necesitan para el desove y la cría de sus larvas zonas del río con fondos de gravas y aguas con una cierta corriente. Si las aguas bajan después del desove, la puesta podría quedarse al descubierto y malograrse; si las aguas están bajas en el periodo de desove, podrían impedir la movilidad de los reproductores e inhibirse la puesta por condiciones hidráulicas adversas. El impacto sobre las poblaciones piscícolas no se limitaría solo a sus posibilidades de reproducción, sino también a la disponibilidad de alimento ya que los macroinvertebrados de fondo se verán afectados por el régimen de vertido del embalse. Los peces de mayor tamaño se verán notoriamente perjudicados si no se mantiene una profundidad mínima de 30 cm que les permita desplazarse y serán más susceptibles a sus depredadores por pérdida de refugio en aguas profundas, más aún si existen oscilaciones bruscas de caudales (Diego García de Jalón, s.f.).

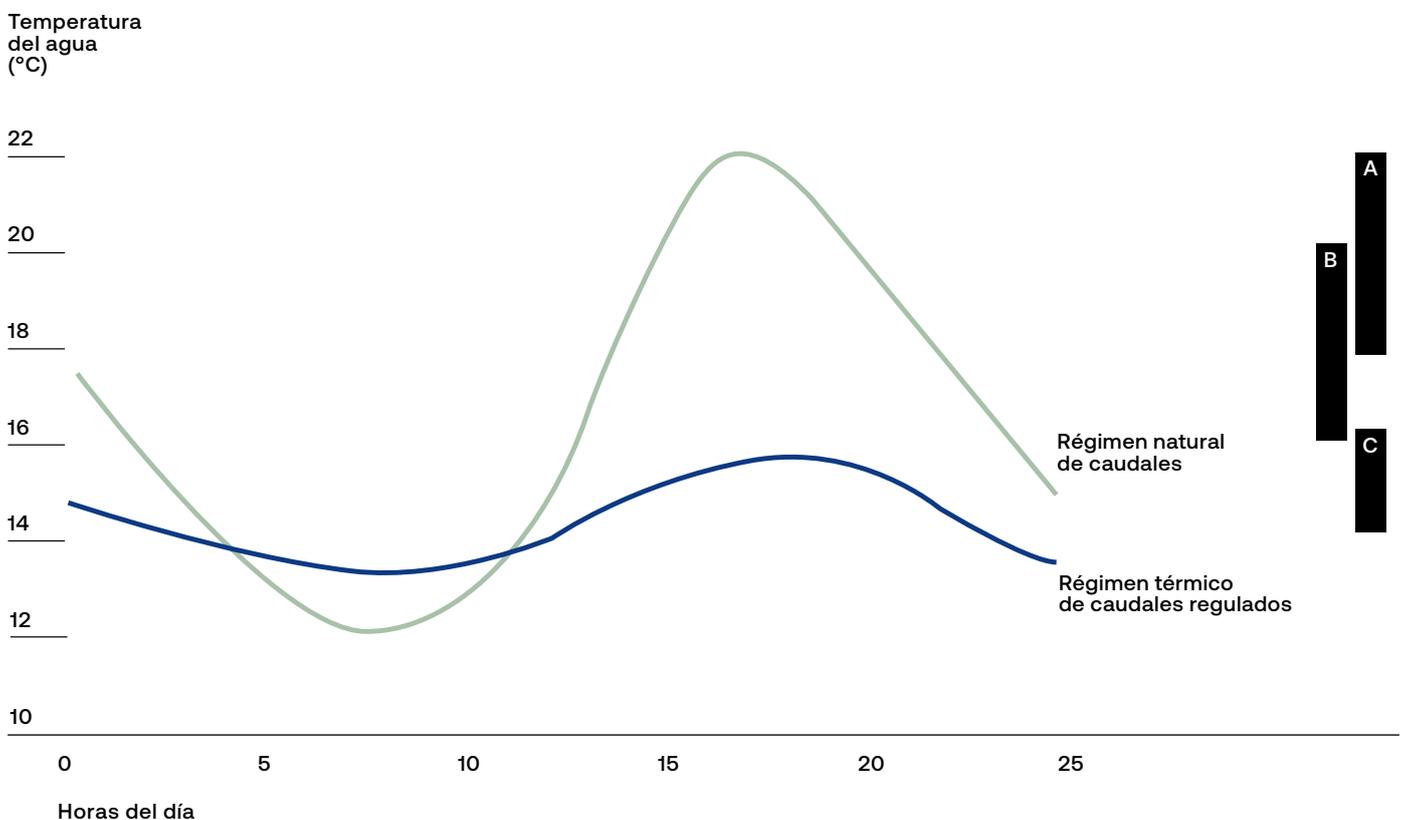
Alteración del régimen térmico por los embalses y su efecto en las aguas descargadas

Los embalses profundos suelen amortiguar notablemente las oscilaciones estacionales y diarias de temperatura, debido a la inercia térmica, efecto claramente identificado en embalses estratificados. Las condiciones térmicas del flujo que afectan a las comunidades acuáticas son las siguientes (García de Jalón, s.f.):

- Variaciones de descargas estacionales. Su efecto está condicionado al punto de toma del agua para el aprovechamiento o para su descarga al cauce natural. Las aguas que salen del hipolimnion son más frías en verano y algo más cálidas en invierno debido a su estratificación; asimismo, la inercia térmica de las masas embalsadas ocasiona que el rango de variación a lo largo del año sea menor. El perifiton presenta una productividad mayor y más sostenida. Las especies más adaptables de bentos se benefician la situación mencionada, sin embargo, aquellas cuyos ciclos biológicos se ajustan más a los ciclos térmicos estacionales quedan eliminadas al no poder acomodarse a las variaciones térmicas marcadas. Los efectos citados presentan consecuencias análogas en los peces.
- Uniformidad térmica diaria del flujo. Las variaciones diarias en la temperatura tienen un papel importante en la regulación del funcionamiento fisiológico de los organismos acuáticos, tanto vegetales como invertebrados y vertebrados poiquilotermos, y su alteración provoca la reducción generalizada de crecimientos y producciones. La comunidad reduce su diversidad debido a la permanencia térmica, lo cual impide el solape de nichos que permiten la eliminación de especies por exclusión competitiva.
- Elevación de las temperaturas invernales. En climas fríos, donde los cauces se hielan, ciertas especies criófilas requieren temperaturas bajo cero para eclosionar, entonces, si la temperatura del agua descargada es mayor, éstas especies no llegan a desarrollar. No obstante, en otras especies, el incremento de temperatura puede generar crecimientos y producciones mayores, más uniformes y sostenidas en los distintos componentes de la comunidad acuática.
- Disminución de la temperatura en época cálida. Se presenta en embalses estratificados en los cuales la toma de agua se realiza del hipolimnion, donde la temperatura del agua es menor incluso en épocas cálidas. Su efecto es negativo en macrobentos debido a que la alteración térmica altera su ciclo biológico e interfiere en sus procesos de crecimiento, maduración y reproducción, que requieren el mantenimiento de ciertos niveles térmicos sostenidos durante un determinado periodo, ocasionando finalmente individuos más pequeños y débiles, o la desaparición de algunas especies; no obstante, en tramos altos, las criófilas pueden ocupar el lugar de las especies desaparecidas, situación que genera un desequilibrio en el ecosistema. Con los cambios en el régimen natural de temperaturas, los peces pueden ver alterado su

Figura 2.6
Exclusión competitiva de las especies A y C por la especie B al pasar del régimen térmico natural al regulado (en las ordenadas se muestran los rangos óptimos de las tres especies)

Fuente: García de Jalón (s.f.)



metabolismo, disminuyendo su crecimiento o siendo interferida su reproducción, y, en algunos casos, puede ocurrir que algunas especies desplacen a otras debido a condiciones más favorables a sus necesidades biológicas. La figura 2.6 muestra lo expuesto anteriormente.

- Alteración de las máximas temperaturas anuales del agua. Las máximas temperaturas anuales son un indicador que emplean muchas especies como clave reguladora de su ciclo biológico, desencadenando procesos como la eclosión, la emergencia o la segregación de hormonas sexuales. Con frecuencia, los insectos acuáticos con adultos aéreos se ven perjudicados al emerger tardíamente y quedar expuestos a temperaturas atmosféricas letales o que inhiben su reproducción.

Alteración de la calidad de las aguas

Los embalses funcionan como grandes reactores químicos que pueden alterar la calidad de las aguas, depositando sustancias en suspensión, precipitando otras y cambiando el potencial redox. Algunos de estos procesos tienen efectos en los sistemas fluviales situados aguas abajo (García de Jalón, s.f.):

- Sobresaturación de gases, especialmente en aprovechamientos hidroeléctricos. Durante la restitución de caudales, se generan altas concentraciones de gases disueltos, más aún si la evacuación de los caudales se produce en caída desde cierta altura, caso en el que el líquido recoge importantes cantidades de aire sumergiéndolo a una profundidad donde la presión hace posible una elevada solubilidad. Las condiciones expuestas pueden ocasionar trastornos en la respiración de los peces, llegando a ser un importante factor de mortalidad en los individuos más jóvenes.
- Disminución del contenido en oxígeno. Los embalses donde se observa una estratificación y procesos de eutrofización presentan déficit de oxígeno disuelto, por tanto, la descarga de estas aguas se realiza sin aireación, lo cual puede ocasionar la mortandad de biota aguas abajo.
- La anoxia en las zonas profundas del embalse genera el predominio de mecanismos metabólicos anaerobios, cuyas sustancias de deshecho son formas reducidas, como el amoníaco, el metano y el sulfhídrico, los cuales, en concentraciones medias y altas, son tóxicos para la mayoría de las especies acuáticas y ocasionan la mortalidad de los peces. A lo indicado, se suma la formación de precipitados de metales pesados, como el hierro y el manganeso, aguas abajo debido a que las condiciones reductoras del embalse favorecen su disolución y se precipitan en el cauce al oxidarse.
- Aumento en las concentraciones de nutrientes. Los embalses actúan como depósitos de acumulación de nutrientes en el fondo, por lo que las descargas de

fondo pueden tener una concentración superior de nutrientes que favorecen la presencia de densas masas de macrófitas y de su fauna asociada; este efecto puede incrementarse como consecuencia de la regulación de crecidas por el embalse.

- Aumento de los sólidos en suspensión. Se genera con las limpiezas de fondo de los embalses a fin de garantizar su vida útil y consisten en vertidos periódicos que arrastran el material sedimentado, principalmente sedimentos finos que no se encuentran acorazados. Estas descargas presentan una alta turbidez, la cual provoca una disminución en la producción primaria que afecta a la comunidad acuática. Posteriormente, los sedimentos decantan en el lecho, homogeneizan el mosaico de microhábitats bentónicos y ahogan el medio intersticial, donde podrían encontrarse huevos de peces, o eliminan sitios de reposo de las diferentes especies que habitan el río.

Impactos específicos de proyectos hidroeléctricos

A continuación se reiteran y complementan los impactos que tienen los proyectos de generación de energía hidroeléctrica en la biodiversidad acuática por la importancia que reviste la alteración de los regímenes de caudales en este tipo de proyectos debido a los bruscos cambios de nivel de las aguas que ocasiona el turbinado y la restitución del agua al río.

Las oscilaciones de caudal bruscas, denominadas “hydro-peaking” (hidro-puntas), surgen de la necesidad de cubrir demandas de energía que no son constantes. Dichas oscilaciones pueden tener una variación diaria e incluso horaria, según requerimiento, y consisten en fuertes variaciones del caudal circulante por los tramos aguas abajo de las turbinas. Las variaciones de caudal estarán condicionadas también por el tipo de central; es decir, si se trata de una principal, que genera energía con regularidad, donde las demandas pueden asumirse como constantes, o si se trata de una central complementaria a otra fuente de energía, caso en el cual el funcionamiento de las turbinas se adecúa a los requerimientos de la demanda y, por tanto, presenta mayor variabilidad.

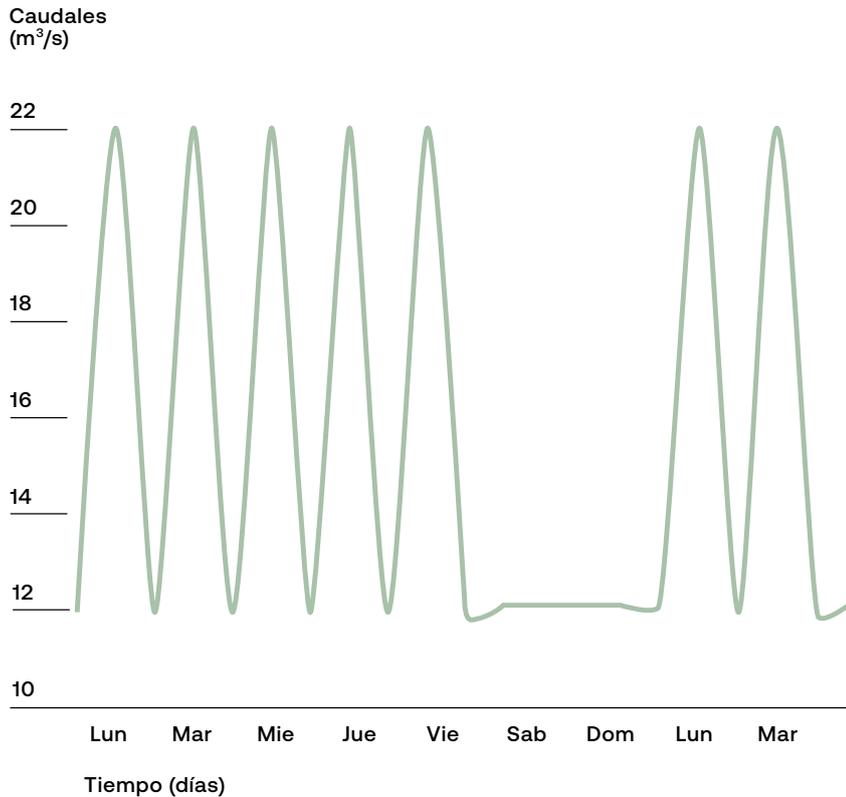
La figura 2.7 muestra las fluctuaciones de caudal que pueden presentarse en una central hidroeléctrica.

García de Jalón (s.f.) explica que:

Cuando el nivel de las aguas baja rápidamente al dejar de funcionar las turbinas, el cauce puede quedar sin flujo y/o con pequeños charcos de agua, situación en la que los macroinvertebrados bentónicos no pueden sobrevivir. Únicamente las especies que pueden migrar a la zona intersticial pueden resistir a la regulación hidroeléctrica de caudales, convirtiéndose sus poblaciones en dominantes en la comunidad macrobentónica. Las oscilaciones diarias fuertes son las que mayores perturbaciones a la comunidad invertebrada provocan.

Figura 2.7
Fluctuaciones del caudal en un río provocadas por el aprovechamiento hidroeléctrico

Fuente: García de Jalón (s.f.)



Respecto a la calidad del agua, agrega que

Cuando se trata de grandes embalses eutróficos, con estratificación y con la obra de toma ubicada en el fondo del embalse, las aguas vertidas aguas abajo son anóxicas, debido a que salen mansas de las turbinas después de haber dedicado su energía potencial a mover las turbinas, razón por la cual causan la muerte de macrobentos y peces.

Adicionalmente, señala que

Las comunidades de peces son afectadas también por la reducción en sus recursos alimenticios y la desestabilización de su hábitat debido al manejo del embalse. Barnes et al. (1984) determinaron que las poblaciones piscícolas que habitaban aguas abajo de un embalse de aprovechamiento hidroeléctrico eran afectadas con una reducción en sus tasas de crecimiento, presentaban inhibición en su reproducción y presentaban un estado generalizado de stress (sic) (p.10).



3.

Procedimiento para el estudio y la determinación de caudales ecológicos

La figura 3.1 muestra las etapas en las cuales se desarrolla el procedimiento para el estudio y determinación de caudales ecológicos.

Figura 3.1
Etapas para el estudio y determinación de caudales ecológicos

Fuente: Elaboración propia



Etapa I. Descripción del proyecto

Introducción

El proyecto de aprovechamiento del recurso hídrico mediante embalses es el elemento impactante del medio ambiente. Los impactos que genera dependerán del tipo de proyecto, de la disposición de sus componentes y de la operación del sistema. El conocimiento pleno de estos elementos permitirá realizar una adecuada selección del método para la determinación de los caudales ecológicos y del cálculo de éstos .

En la presente etapa de la Guía, se describen las características del proyecto, con sus particularidades en función del objetivo de aprovechamiento del agua.

Figura 3.2
Actividades de la etapa I del procedimiento

Fuente: Elaboración propia



Descripción del proyecto

La descripción del proyecto debe incluir la siguiente información:

- Objetivo del proyecto.
- Ubicación.
- Características generales de la cuenca de aprovechamiento (hidrológicas, fisiográficas, climáticas).
- Disponibilidad del recurso (tipo de fuente, caudales que se aprovecharán).
- Demanda de agua (características de los usuarios, caudales demandados).
- Descripción detallada de los componentes del proyecto. Esto dependerá del tipo de proyecto.

— En proyectos de riego y abastecimiento humano incluirá:

- Tipo de presa
- Curvas características (altura, área, volumen)
- Volúmenes y alturas características
- Obras de excedencias
- Obras de captación
- Obras de conducción

Figura 3.3

Componentes generales de un proyecto de aprovechamiento de recursos hídricos con presa para consumo humano

Fuente: Elaboración propia en base a imágenes del Google Earth



Figura 3.4
Componentes generales de un proyecto de aprovechamiento de recursos hídricos con presa para riego

Fuente: Elaboración propia en base a imágenes del Google Earth



Figura 3.5
Componentes generales de un proyecto de aprovechamiento de recursos hídricos con presa para generación de energía

Fuente: Elaboración propia en base a imágenes del Google Earth



— En proyectos de generación hidroeléctrica comprenderá:

- Tipo de central
 - i. Centrales de agua fluyente. También denominadas “centrales de filo de agua” o “de pasada”. Utilizan parte del flujo de un río para generar energía eléctrica. Operan de forma continua porque no tienen capacidad para almacenar agua al no disponer de embalse. Turbinan el agua disponible en el momento, limitada por la capacidad instalada. Las turbinas pueden ser de eje vertical cuando el río tiene una pendiente fuerte, u horizontal cuando la pendiente del río es baja. En este tipo de aprovechamiento es relevante la forma de restitución del flujo al cauce, que generará una alteración respecto a las condiciones naturales, aunque se debe aclarar que no se estaría alterando la cantidad del caudal, sino las condiciones de restitución.

ii. Centrales de embalse. Es el tipo más frecuente de central hidroeléctrica. Utilizan un embalse para almacenar agua e ir regulando el caudal que pasa por la turbina. Es posible generar energía durante todo el año si se dispone de reservas suficientes. Requieren una inversión mayor.

iii. Centrales de regulación. Almacenan el agua que fluye por el río y son capaces de cubrir horas de consumo.

- Tipo de presa
- Curvas características (altura, área volumen)
- Volúmenes y alturas características
- Obras de excedencias (aliviaderos, compuertas, etc.)
- Obras de disipación de energía
- Obras de captación
- Obras de conducción
- Casa de máquinas (tipo de turbinas)
- Forma de restitución de caudales turbinados
- Reglas de operación de los embalses

Etapa II. Caracterización del sistema hídrico (físico y biótico)

Introducción

El objetivo de esta etapa es caracterizar y evaluar el ecosistema fluvial que será intervenido por el proyecto. En esta etapa, la mayor parte de la información debería recopilarse del estudio hidrológico e hidráulico del proyecto y del estudio ambiental que se desarrollaría de forma paralela al proyecto de ingeniería.

Las actividades que se consideran en ella están reflejadas en la figura 3.6.

Figura 3.6
Actividades de la etapa II del procedimiento

Fuente: Elaboración propia



Definición del área objeto del estudio

El objetivo de esta etapa es delimitar el área geográfica en la cual se realizarán los estudios que permitirán llegar a establecer los caudales ecológicos.

Para el establecimiento de dicha área, se consideran dos niveles de análisis: uno macro, que abarca toda la cuenca, y otro micro, que toma en cuenta el curso aguas abajo de la presa, hasta una longitud en la cual se estime que el impacto del embalse será atenuado.

A nivel macro

El área de la cuenca permite establecer la magnitud del aprovechamiento y, mediante sus características, identificar los factores que influirán en la generación de caudales. Sus límites son bien definidos y abarcan desde el sitio de emplazamiento de la presa hasta los límites de la cuenca aguas arriba.

A nivel micro

El área de estudio a nivel micro se sitúa aguas abajo de la presa y abarca el curso y sus áreas de inundación. Su longitud estará condicionada principalmente por el tipo de proyecto, los aportes que se reciban aguas abajo y los usos o servicios ambientales que se presenten en cada entorno específico, razón por la cual el área de estudio micro se irá modificando de acuerdo con las condiciones locales, que, preliminarmente, estarán delimitadas por el tipo de proyecto:

- En proyectos de centrales hidroeléctricas, el área de estudio a nivel micro abarca la zona de captación (obra de toma), la zona de restitución y la zona hasta la cual se percibe que el impacto se disipa, ya sea por una reposición natural de las características del agua o debido a la influencia de aportes de afluentes importantes al cauce. Se reitera que la restitución puede generar una variación de caudal diaria o incluso horaria (*hydropeaking*), lo que se traduce en grandes oscilaciones de caudal y, por tanto, el área de influencia de su impacto es mayor.
- En proyectos de abastecimiento urbano o de riego, al tratarse de un uso consuntivo, el área de estudio se puede extender hasta el siguiente aportante al río, siempre considerando si existen usos aguas abajo, incluidos los servicios ambientales.

Caracterización física

El objetivo de la caracterización física del área en estudio es generar la información necesaria para establecer las particularidades del sistema hídrico, que condicionarán los grupos de metodologías de cálculo de caudales ecológicos más adecuados para su aplicación en un ámbito específico. Para establecer los caudales ecológicos, por tanto, es necesario realizar una apropiada caracterización del sistema físico considerando aspectos hidrológicos, morfológicos del río y fisicoquímicos del agua en condiciones sin proyecto. La información generada, una vez definido el método de cálculo de caudales ecológicos, podrá ampliarse según los requerimientos específicos del método, tomando en cuenta que a mayor complejidad del método mayor requerimiento de información.

A continuación se consideran los elementos mínimos necesarios de la caracterización del sistema fluvial para la elección del método adecuado para la determinación del régimen de caudales ecológicos.

Caracterización hidrológica

La caracterización hidrológica considera la cuenca y los caudales que se generan en ella.

A nivel macro

Es importante citar las características generales de la cuenca y su ubicación, y describir la red de drenaje principal de la cual forma parte, sus parámetros morfométricos principales hasta el sitio de presa (área, longitud del curso principal, altura máxima y mínima, tiempo de concentración, factor de forma, factor de circularidad) y, de forma general, los tipos de cobertura vegetal y los usos del suelo. Como parte de la caracterización, debería elaborarse la curva hipsométrica de la cuenca a fin de establecer el estado de evolución en el que se encuentra (estado juvenil, maduro o de vejez), ya que el dato mencionado de forma implícita muestra los fenómenos que se presentan en ella y que están relacionados fundamentalmente con procesos de erosión y sedimentación. La descripción a nivel macro deberá incluir un análisis de los parámetros principales, la forma de respuesta de la cuenca a las precipitaciones, una descripción del potencial de infiltración en función de los tipos de suelos y de vegetación, y referencias al uso de suelos.

Se deberá complementar la información con una caracterización climática en el área del proyecto.

A nivel micro

La caracterización hidrológica a nivel micro considera el análisis del régimen de caudales en la zona específica de implementación del proyecto. Este análisis es fundamental debido a que permite identificar la variabilidad natural de los caudales, tanto a nivel medio como de crecidas ordinarias, incluyendo la presencia de fenómenos climatológicos, que, en conjunto, son los que proporcionan las condiciones para que se desarrolle la biodiversidad particular del curso y su entorno.

- Recopilación de información. Para desarrollar una completa caracterización hidrológica orientada a la determinación del caudal ecológico, se requiere contar con datos de caudales en estaciones ubicadas en el curso donde se realizará el proyecto y, si es posible, en estaciones aledañas en afluentes que se encuentren aguas abajo del sitio de la presa.

- La información de caudales, en lo posible, deberá ser a nivel diario; de forma alternativa, se pueden emplear caudales mensuales, siendo siempre deseable trabajar con información diaria; el periodo de registro mínimo a considerar es de 20 años. El tipo de información disponible, ya sea diaria o mensual, condicionará el tipo de métodos hidrológicos a considerar, si es que este fuera recomendado.
- En caso de no contar con datos de caudales en el curso en estudio, se podrá recurrir a información de cuencas que tengan similitud hidrológica. Otra forma de generar información de caudales en cuencas sin los datos mencionados, pero en las que se cuente con datos de precipitación y temperatura, es a través de la elaboración de balances hídricos –por ejemplo, con la metodología de Thornthwaite y Mather, que, empleando adicionalmente datos de latitud, permite obtener el escurrimiento anual en la cuenca. El escurrimiento mensual se debería obtener a través de relaciones que mantengan el régimen de precipitaciones o, alternativamente, se podría recurrir a cuencas hidrológicamente semejantes y asimilar el mismo régimen de caudales mensuales. En ambos casos, los valores obtenidos requerirán de verificaciones o calibraciones a partir de aforos realizados en la época que dure el estudio de ingeniería o mediante la aplicación de modelos de transformación de precipitación en escorrentía, caso en el cual se deberán tomar en cuenta los factores que condicionan el escurrimiento, es decir, suelos, cobertura vegetal y, por supuesto, precipitaciones. Se recomienda el empleo de los mismos métodos de cálculo de caudales utilizados en el estudio hidrológico del proyecto (por ejemplo, método del hidrograma triangular, método racional, etc.). En los casos mencionados, también se requerirá generar información para un periodo igual o mayor a 20 años, en base a estaciones en las que previamente se hubieran realizado los análisis de consistencia y homogeneidad.
- La información mencionada no debería ser difícil de obtener o generar, ya que el estudio de caudales ecológicos forma parte de un proyecto de aprovechamiento de recursos hídricos, el cual debería contar con un estudio hidrológico específico.
- Régimen de caudales. El régimen de los caudales en un río es fundamental para el análisis de caudales ecológicos debido a que las condiciones hidrológicas están ligadas a procesos ecológicos; por tanto, es imprescindible conocer la magnitud de los caudales, la frecuencia, duración e intensidad de los pulsos de crecidas y estiaje, así como su ritmo de cambio. El cuadro 3.1 presenta una descripción de los componentes de un hidrograma y varios procesos ecológicos que se presentan debido al régimen de caudales, los cuales se emplean con detalle en la determinación de índices de alteración hidrológica.
- Los hidrogramas naturales sirven de elementos de partida para conocer el significado ecológico del régimen de caudales. En la figura 3.7, se muestra la relación hidroecológica en un curso representada en un hidrograma que incluye las funciones ecológicas que se presentan a lo largo de su desarrollo.

Cuadro 3.1

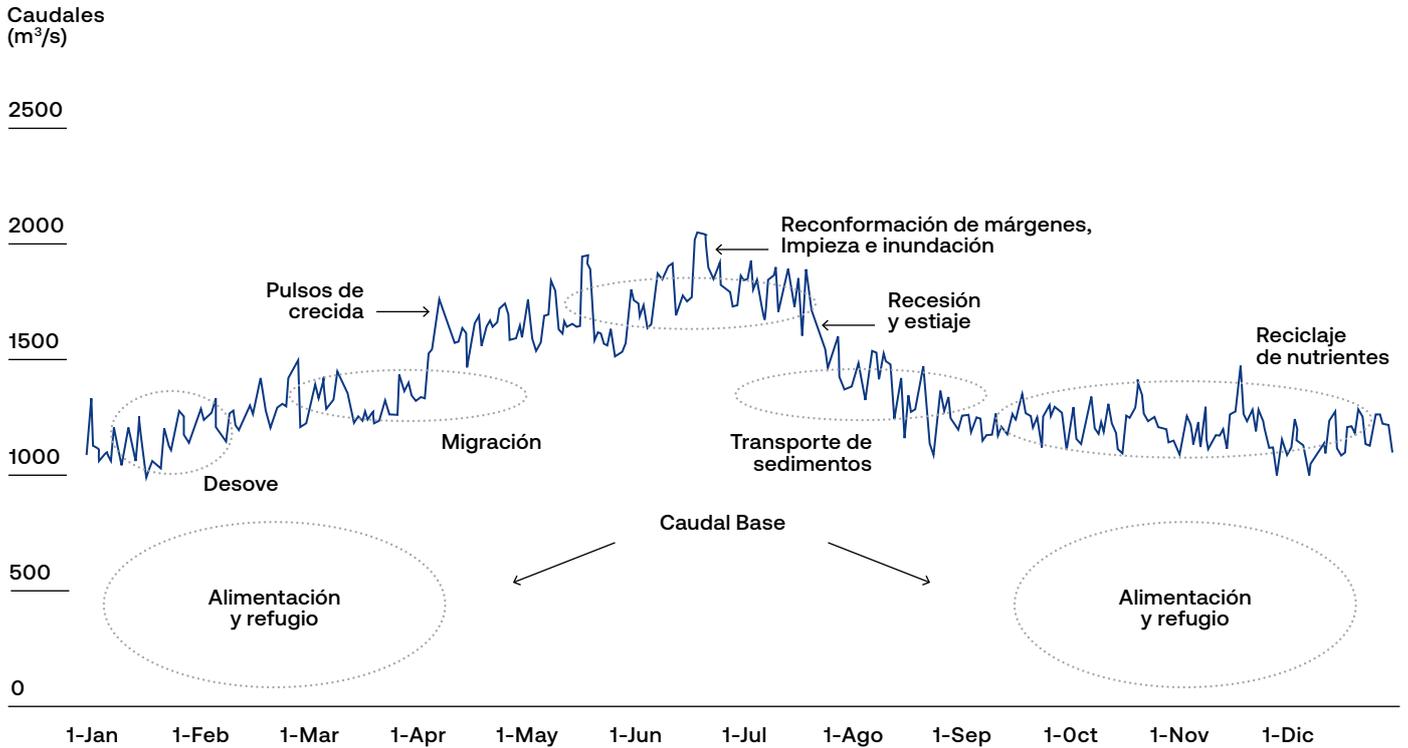
Relaciones ecohidrológicas interpretadas a través de los criterios del régimen hidrológico natural (Poff et al, 1997), según los diferentes componentes del hidrograma y los procesos ecológicos que dependen de ellos

Fuente: Estrategias para la Aplicación del Régimen de Caudales Ecológicos Acciones y mecanismos para la implementación de caudales ecológicos en el campo, Elaborado por: Ing. Daniela Rosero L. MSc. Ing. Dunia González Z. PhD.

Criterios del régimen natural	Componentes del hidrograma	Procesos ecológicos
Magnitud	Caudales bajos, caudales altos	
Duración	Crecidas, estiaje, caudales base	
Intensidad	Pulsos, avenidas, estacionalidad	Hábitats, migración, reciclaje de nutrientes, transporte de sedimentos, limpieza y reconfiguración de cauces, colonización, desove, pesca, navegación
Frecuencia	Años hidrológicos típicos	
Ritmo de cambio	Variabilidad local	

Figura 3.7
Representación de los aspectos ecológicos e hidrológicos del régimen natural,
para el caso de un río de montaña en la Amazonia Sur del Ecuador

Fuente: Estrategias para la Aplicación del Régimen de Caudales Ecológicos Acciones y mecanismos para la implementación de caudales ecológicos en el campo, elaborado por: Ing. Daniela Rosero L. MSc., Ing. Dunia González Z. PhD.



- Por lo tanto, se debe caracterizar el régimen natural de los caudales a partir de los registros con el propósito de obtener hidrogramas que muestren su variabilidad temporal. Este dato se constituirá en un insumo para reproducir su comportamiento y periodicidad en los caudales ecológicos. Para ello, se requiere generar la siguiente información:
 - Tipo de curso (nival, pluvial, nivopluvial, lacustre, efímero, intermitente o glacial, entre otros).
 - Régimen de caudales medios, mínimos y máximos.
 - Régimen de caudales en sequías moderadas, severas y extremas.
 - Régimen de caudales en excesos moderados y extremos.
 - Régimen de caudales con el fenómeno de El Niño y La Niña.
- Para determinar años de características secas y húmedas, se podrá emplear el método del percentil, tomando como referencia el cuadro 3.2.

Cuadro 3.2
Caracterización de periodos secos y húmedos según el método del percentil

Fuente:

Percentil	Caracterización
Percentil 30	Deficiencia
Percentil 15	Sequía moderada
Percentil 10	Sequía severa
Percentil 5	Sequía extrema
Percentil 80	Exceso moderado
Percentil 90	Exceso extremo

- Para la determinación de años con presencia del fenómeno de El Niño y La Niña, se deberá recurrir a los servicios de hidrología y meteorología de cada país u otras fuentes, a fin de recabar información histórica sobre los años en los cuales se identificaron tales fenómenos.

- El conocimiento del régimen de caudales bajos es necesario para establecer eventos de presión hídrica máxima sobre el conjunto de organismos que coexisten en el área en estudio; en tal sentido, como parte de la hidrología que apoya al área biótica, será necesario determinar los caudales mínimos sostenidos durante varios días consecutivos en un año (3, 7, 30 o más) a través de un análisis estadístico de medias móviles de los caudales diarios, con amplitudes de ventana incrementales de hasta 90 días. Esto permitirá cuantificar el caudal medio diario que los organismos pueden soportar cada año durante los períodos más secos que se presentan con duraciones prolongadas.
- La recurrencia de los caudales bajos medios mensuales se puede realizar también a partir de una curva de duración de caudales que se ajusta a una función de distribución de probabilidades –por ejemplo, la distribución normal, distribución logarítmica normal, distribución de Gumbel, distribución de eventos extremos, distribución de Pearson Tipo III, entre otras–, buscando entre ellas la que presente un mejor ajuste.
- Las crecidas ordinarias, de recurrencias o periodos de retorno de entre 1 y 6 años, son las que mantienen la morfología de los cauces y, a su vez, definen las zonas ribereñas; por tanto, es necesario también caracterizarlas (en magnitud, frecuencia y duración) para que formen parte del análisis de caudales ecológicos.
- Si se dispone de un registro de caudales continuo, es posible identificar las crecidas ordinarias; sin embargo, cuando las mediciones de caudales son puntuales (no continuas) –por ejemplo, tres veces al día–, las crecidas no suelen registrarse, en cuyo caso se deberán emplear métodos de transformación de precipitación en escorrentía para generarlos. Los métodos a emplear deberán ser los mismos que en el estudio hidrológico del proyecto, los cuales, a su vez, se debieron definir en función del tamaño de la cuenca y las características específicas del lugar (p. ej., método del hidrograma triangular sintético, método racional, etc.)¹.

Caracterización morfológica del río

La morfología natural del río y su régimen se constituyen en el medio en el cual se desarrolla la vida acuática; por tanto, es fundamental conocer sus características para determinar los caudales ecológicos que deberán permitir que la vida se mantenga luego del aprovechamiento del recurso agua.

Aspectos fundamentales, desde el punto de vista biótico, son las características de profundidad de flujo, su velocidad, el sustrato y la dinámica del arrastre de sedimentos (erosión-sedimentación) ya que alteraciones en los elementos mencionados ocasionarán efectos en el hábitat fluvial.

La caracterización morfológica consiste en:

- Un análisis morfológico a nivel macro, que puede abarcar hasta una distancia de 100 km sobre el río o una distancia menor si se encuentra antes un afluente de importancia desde el sitio de la presa.
- Un análisis morfológico a nivel de micro cuya longitud dependerá del tipo de proyecto, pero que, de cualquier manera, deberá sobrepasar la zona de restitución en el caso de proyectos hidroeléctricos o donde se cuente con el aporte importante de un afluente al curso.
- Un análisis del transporte de sedimentos.

A nivel macro

La caracterización morfológica a nivel macro debe incluir el área de estudio definida por el tipo de proyecto y su posible área de influencia por efecto de la regulación del río.

Para este análisis, se puede recurrir a imágenes satelitales, fotografías aéreas o incluso imágenes de “Google Earth”, o a relevamientos con drones con objeto de identificar el tipo de cauce en estudio.

Los cauces bien definidos se presentan generalmente en las partes altas de las cuencas, donde las pendientes también son altas, las velocidades de flujo suelen ser elevadas, con frecuencia se desarrolla el flujo en régimen supercrítico o subcrítico turbulento y las variaciones de caudal a lo largo del año son importantes. Estos cursos tienden a erosionar y poseen un elevado potencial de arrastre de material, mientras que la rugosidad del cauce es alta. Otra característica de los cauces en las partes altas de las cuencas es que su desarrollo en planta no es dinámico y está condicionado a la topografía montañosa u ondulada, en forma de valle. En la parte media de una cuenca, también pueden encontrarse cauces bien definidos, pero con mayor posibilidad de cambios en la forma del cauce visto en planta, debido a la reducción de la pendiente. En la parte baja de las cuencas, es posible identificar cursos definidos, pero inestables en cuanto a su desarrollo en planta; pueden ser meándricos y cambiar su rumbo en función de los procesos de deposición de

¹ Los parámetros que permiten caracterizar el régimen de caudales naturales, si bien se pueden obtener del estudio hidrológico del proyecto o generar a partir de información básica de caudales diarios aplicando metodologías clásicas, también se pueden obtener mediante programas informáticos existentes, tal como el IHA (índice de alteración del hábitat), desarrollado por *The Nature Conservancy*, que permite el análisis de caudales en estado natural y con proyecto, proporcionando una serie extensa de parámetros: 34 para el índice de iteración del hábitat y 33 para caudales ecológicos (véase <http://conserveonline.org/workspaces/iha>, https://www.conservationgateway.org/Documents/IHAV7-1%20manual%20Spanish_0.pdf).

Figura 3.8 Escalas de análisis de los cauces

Fuente: Elaboración propia en base a imágenes de Google Earth y fotografías aéreas



material luego de crecidas. Los ríos trenzados suelen encontrarse en las zonas medias y bajas de la cuenca, donde se produce una disminución relativamente rápida de la pendiente, pero el flujo viene con un alto nivel de energía desde aguas arriba y altas cargas de sedimento, y el valle no confina el cauce (cono aluvial), con lo cual existe una dinámica fluvial en planta. En época de estío, el flujo de estos cursos puede concentrarse en un curso principal y, en períodos de crecidas, inundar zonas adyacentes y originar cursos secundarios, regidos por los cambios en los procesos de erosión-sedimentación.

Rosgen (1996) propone una clasificación de los cauces atendiendo al gradiente longitudinal, la forma de la sección y la sinuosidad del cauce. La clasificación se hace a nivel paisajístico, considerando siete grandes tipos de cauce: "A", cauces de cabecera; "B", cauces intermedios; "C" y "E", cauces meandriformes; "D", cauces anastomosados; "F", cauces encajonados y "G", gargantas. Los tipos

principales se subdividen en otros seis subtipos, según sea la naturaleza del sustrato: 1) lechos de roca; 2) lechos con bolos y bloques; 3) lechos de gravas; 4) lechos de gravillas; 5) lechos arenosos y 6) lechos limosos o arcillosos. Los criterios mencionados permiten caracterizar el tramo en estudio a nivel macro, de acuerdo con el cuadro 3.3 y las figuras 3.9 y 3.10.

El tipo de cauce indica, a priori, las ventajas y dificultades de la posible aplicación de un método hidráulico.

Cuadro 3.3

Crterios para la clasificacin de tipos de cauce atendiendo a la sinuosidad del trazado, a la forma de la seccin transversal y a la pendiente longitudinal

Fuente: Rosgen (1996), en Mayo Rustarazo (2000)

Descripcin	Relacin A/P	Pendiente longitudinal	ndice de sinuosidad	Tipo	Paisaje, suelos, caractersticas
Muy pendiente, encajonado, transporte de materiales, torrentes.	< 12	> 10	1,0 – 1,1	Aa+	Relieve muy acentuado. Cauces erosivos, con roca o materiales gruesos. Cauces muy encajonados. Saltos, rabiones o incluso cascadas. Pozas profundas.
Pendiente, encajonado, saltos y rpidos. Alternancia de zonas de erosin y de deposicin. Muy estable si predominan bloques y roca.	< 12	0,04 – 0,10	1,0 – 1,2	A	Relieve acentuado. Cauces erosivos, con roca o materiales gruesos. Cauces confinados con zonas de cascadas. Pozas profundas y espaciadas asociadas a las caractersticas del lecho.
Encajonamiento moderado, aguas rpidas con escasas pozas. Bancos y llanura de inundacin muy estables.	> 12	0,02 – 0,039	> 1,2	B	Relieve moderado. Riberas formadas por coluvios o afloramientos. Encajonamiento moderado. Valles estrechos con laderas pendientes. Los rpidos predominan sobre las pozas.
Pendiente baja, meandros, zonas de deposicin de finos, alternancia de rpidos y pozas. Cauces aluviales con amplias llanuras de inundacin bien definidas.	> 12	< 0,02	> 1,4	C	Valles amplios con terrazas y llanuras de inundacin, suelos aluviales. Encajonamiento mnimo, con sinuosidad moderada. Alternancia de rpidos y pozas.
Cauces anastomosados con barras longitudinales y transversales. Gran anchura y bancos erosionados.	> 40	< 0,04	-	D	Valles amplios con conos de deyeccin, depósitos aluviales o glaciares. Reajustes de la anchura abundante aportacin de sedimentos. Procesos de agradacin y erosin de los bancos laterales. Gran carga de sedimentos.
Canales mltiples (anastomosados) pero estrechos y profundos, con llanuras de inundacin bien vegetadas y bancos muy estables. Zonas hmedas asociadas.	Muy variable	< 0,005	Muy variable	DA	Valles muy amplios con suelos aluviales de elementos muy finos. Poca carga de sedimentos. Desplazamientos laterales controlados por los bancos muy estables.
Pendiente muy baja, amplios meandros con alternancia de rpidos y pozas y poca deposicin. Relacin A/P baja, cauce muy eficiente y estable.	< 12	< 0,02	> 1,5	E	Valles amplios con praderas. Llanuras de inundacin de materiales aluviales. Cauce muy sinuoso, pero con bancos estables y consolidados.
Cauce meandriforme pero encajado, con poca pendiente, alternancia de rpidos y pozas. Relacin A/P alta.	> 12	< 0,02	> 1,4	F	Encajonamiento en los materiales erosionados. Desplazamientos meandriformes inestables con erosin de los bancos.
Cauce encajado, formando una garganta. Pendientes suaves, alternancia de pozas y saltos. Relacin A/P baja.	< 12	0,02 – 0,039	> 1,2	G	Gargantas, valles estrechos o profundamente excavados en depósitos coluviales o aluviales (conos de deyeccin o deltas). Cauces inestables con fuerte erosin de los bancos laterales.

Figura 3.9
Clasificación de los cauces fluviales atendiendo a su pendiente longitudinal, la sección del cauce y la sinuosidad de trazado

Fuente: Rosgen (1996), en Mayo Rustarazo (2000)

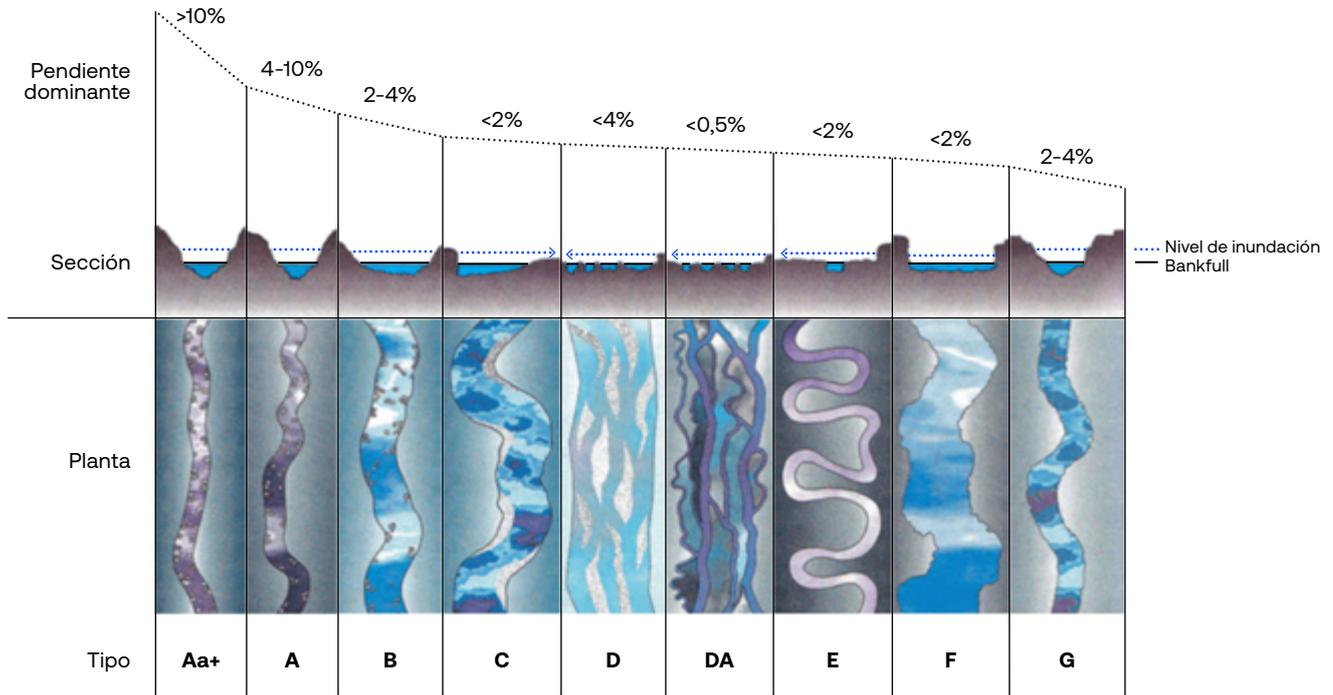
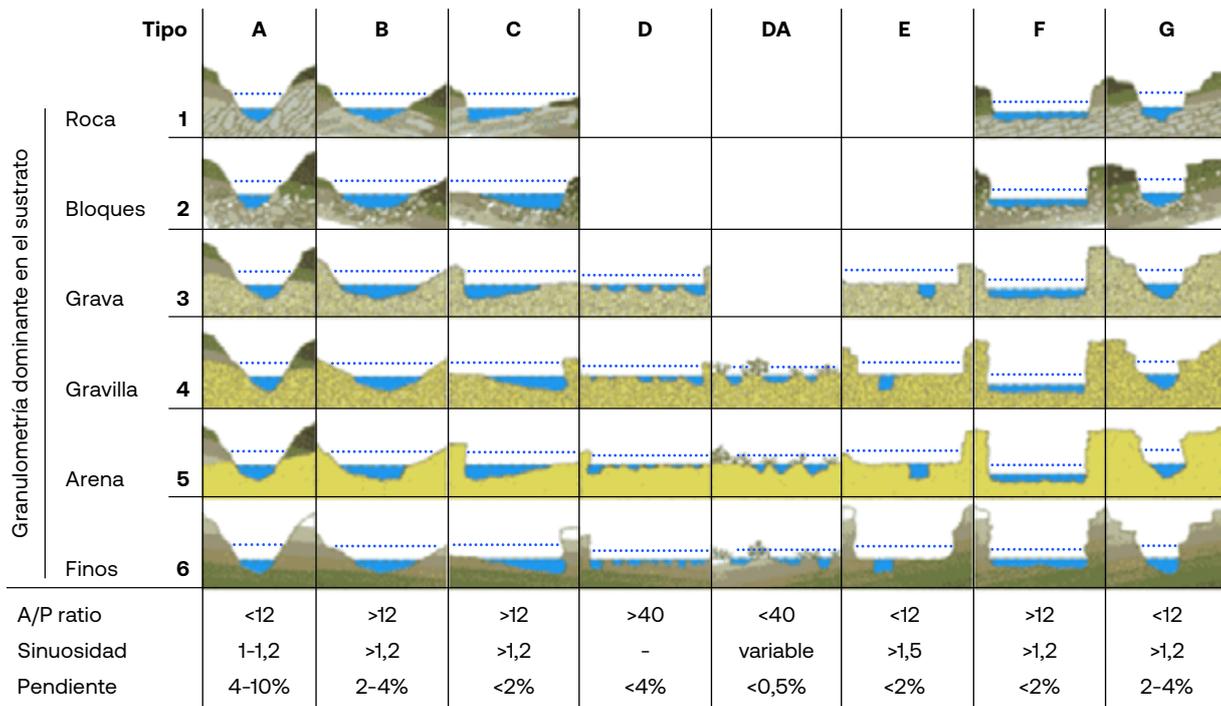


Figura 3.10
Distintas secciones transversales en función de la naturaleza del sustrato y su correspondencia con el trazado longitudinal

Fuente: Rosgen (1996), en Mayo Rustarazo (2000)



A nivel micro

El análisis micro de la morfología del río está ligado a la biodiversidad que alberga y a las características hidráulicas de un tramo específico del río. Por ende, será necesario conocer de forma previa si el curso mantiene fauna íctica nativa o especies relevantes, o si hay, aguas abajo de la presa, algún ecosistema particular que se desee conservar por constituirse en un servicio ambiental. En caso positivo, la descripción del cauce debe incluir con detalle las unidades hidromorfológicas empleadas por los diferentes ecosistemas presentes. Las unidades del cuadro 3.4, se presentan a título de referencia.

Las unidades hidromórficas mencionadas no se presentan de forma única; generalmente presentan secuencias y combinaciones. El tipo de unidades hidromórficas y sus secuencias debe identificarse y explicarse como parte del análisis micro a fin de que sea analizado también en el área biótica, con el objetivo de evaluar su importancia, funcionalidad y necesidad de conservación.

A nivel micro, por tanto, se deben identificar cambios de secciones relevantes considerando aspectos hidráulicos y bióticos. En función de la topografía levantada o de modelos digitales de terreno, es necesario extraer información de la pendiente del río a través de un perfil longitudinal que

Cuadro 3.4

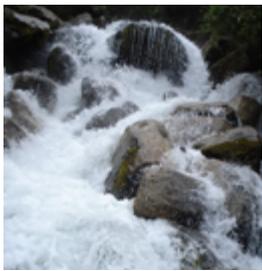
Unidades susceptibles de ser incluidas en la descripción morfológica del río

Fuentes:

Cascada, caída y rápido: Guía para la evaluación de la calidad acuática mediante el índice BMWP/Bol. Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego, Ministerio de Medio Ambiente y Agua. Bolivia. Fotografías: T. Kucharsky.

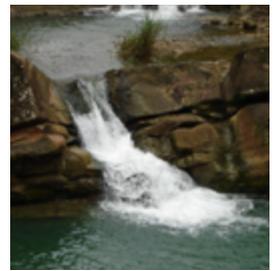
Plano, poza y canal: Guía para la evaluación de la calidad acuática mediante el índice BMWP/Bol. Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego, Ministerio de Medio Ambiente y Agua. Bolivia.

Remansos: Guía para la evaluación de la calidad acuática mediante el índice BMWP/Bol. Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego, Ministerio de Medio Ambiente y Agua. Bolivia. Ministerio de Medio Ambiente y Agua (2011). Fotografías: T. Kucharsky.



Cascada. Se presenta cuando hay una obstrucción en el lecho río, que genera un incremento en la velocidad del agua originando una caída menor. El sustrato está conformado por grava, arena y arenilla.

Poza. Son zonas profundas (>60 cm), de pendiente leve y corriente lenta, que se han formado durante las crecidas y donde la granulometría del sustrato es variable. Tienen orígenes diversos (obstáculos dentro del lecho que producen cascadas y forman al pie de estas las pozas).



Caída. Se produce cuando la roca aflora y un accidente geológico conduce a una rotura provocando un salto importante. El sustrato está conformado por grava, arena y arenilla.

Canal. Es un tramo predominantemente recto de un curso, con sección en U y profundidad variable en función de la magnitud de la cuenca. Las características hidráulicas del curso estarán condicionadas a la pendiente del río. El sustrato puede ser variable y contener desde roca hasta arenas.



Rápido. Se presenta en cursos donde las pendientes son mayores del 4 %, el flujo es supercrítico o subcrítico turbulento. El sustrato es grueso y los bloques y piedras son susceptibles de ser desplazados en crecidas. La distribución de los materiales es aleatoria. Detrás de los bloques, se pueden depositar materiales finos, gravas y arena. Son zonas muy productivas para los macroinvertebrados.

Remansos. Se presentan en zonas de menor velocidad, alejadas de la corriente principal, donde el curso se ensancha o tiende a depositar material.



Plano. Es un lecho ensanchado de poca pendiente donde la velocidad de la corriente es uniforme y menor de 40 cm/s y la profundidad inferior a 40 cm. El sustrato más grueso está conformado por piedras y la grava aportada por las crecidas. Son zonas de tránsito de materiales finos más que zonas de depósito o erosión.

muestre la irregularidad del cauce y las secciones tipo. Se reitera que la definición de secciones se debe realizar de forma coordinada con el área biótica, con objeto de establecer su representatividad, si es que corresponde.

En cada sección representativa, se deberán realizar aforos a fin de establecer parámetros de interés para el área biótica (véase acápite 3.2.4, A).

Otro aspecto importante a considerar, desde el punto de vista hidráulico y biótico, es el sustrato del cauce, mencionado de forma genérica en los anteriores párrafos. Será necesario caracterizar, por tanto, los tipos de suelos que se presentan, tanto en el cauce como en las riberas del río. Para lograrlo, además de una inspección visual, se puede acudir a estudios realizados en la ingeniería del proyecto, específicamente geotécnicos, que cuenten con información granulométrica del lecho. No obstante, en campo, se puede acudir a escalas granulométricas para la definición del tipo de sustrato, empleando, por ejemplo: i) tipos de sustrato presentes en porcentajes (en un área de unos 15 cm de radio alrededor del punto), según la clasificación de la "American Geophysical Union", simplificada así: roca madre (roca continua), grandes bloques (>1024 mm), bloques (256-1024 mm), cantos rodados (64-256 mm), grava (8-64 mm), gravilla (2-8 mm), arena (0,62 mm²), limo (< 0.62 mm) y vegetación; o ii) la escala de Wentworth, que, de forma genérica, indica que las partículas de más de 63 mm de diámetro se clasifican como cantos rodados, las más pequeñas corresponden a guijarros, gránulos, arena y limo, y las de menos de 0,002 mm corresponden a arcilla, como se ilustra en la figura 3.11.

Complementariamente, como parte del análisis micro, se debería incluir la caracterización del transporte de sedimentos, para lo cual será necesario contar con datos de calicatas que proporcionen la distribución granulométrica de los suelos y, a partir de ella, estimar su capacidad de transporte empleando ecuaciones como la de Meyer-Peter y Müller, para, posteriormente, poder inferir los efectos, ya sea de vertidos periódicos de material o sólido o su total retención en la presa. La información solicitada se puede extraer del estudio hidráulico del proyecto.

Caracterización de la calidad del agua

La caracterización de la calidad del agua del agua, para el objetivo de la guía, es necesaria para establecer la salud de los hábitats y la diversidad de la comunidad biológica en los sistemas acuáticos que dependen de sus propiedades. Se debe realizar basándose en los parámetros físico-químicos y biológicos establecidos en las normas ambientales vigentes en cada país y según protocolos estándar internacionalmente aceptados.

Los puntos de muestreo deberán ser coordinados con especialistas del área biótica, considerando, además, que dichos puntos deberán coincidir con secciones representativas del río (desde el punto de vista topográfico),

Figura 3.11
Clasificación granulométrica de Wentworth/Doeglas y DIN 4022

Fuente: <https://www.geovirtual2.cl/geologiageneral/ggcap05b-2.htm>

(mm)	Wentworth/Doeglas	DIN 4022	(mm)
Bloques			
63	Muy grueso		63
32	Grueso	Grueso	
16	Medio	Medio	20
8	Fino		6,3
4	Muy fino	Fino	
2	Muy grueso		2
1	Grueso	Grueso	
0,5	Medio	Medio	0,63
0,25	Fino		0,2
0,125	Muy fino	Fino	
0,063	Muy grueso		0,063
0,032	Grueso	Grueso	
0,016	Medio	Medio	0,02
0,008	Fino		0,0063
0,004	Muy fino	Fino	
0,002			0,002
Arcilla			

en los que también se deberían realizar transectos para caracterizar el ecosistema acuático (con los componentes que establezca el especialista en biología) y medir parámetros hidráulicos.

- Los sitios de muestreo seleccionados deberán ser descritos, georeferenciados y cumplir con criterios de representatividad y homogeneidad del flujo. Asimismo, se tomará en cuenta para los muestreos la variación de la calidad del agua en relación con los ciclos estacionales, de forma que queden representados periodos húmedos, secos y de transición.

Los muestreos a realizar consideran para su análisis dos fases, una *in situ* y otra en laboratorio.

Caracterización *in situ*

Para la caracterización *in situ* se emplearán laboratorios portátiles certificados, previamente calibrados. Se empleará una muestra en la cual se medirán los siguientes parámetros: temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto (OD), pH y turbidez, los cuales son los que más aportan a la estructura y funcionamiento del ecosistema acuático.

- La temperatura es una medida del grado de calor del cuerpo de agua. Este parámetro puede incidir mucho en la calidad del agua, ya que determina otras propiedades y procesos que tienen lugar en ella, como la viscosidad, la solubilidad de los gases y de las sales, procesos fisiológicos de los organismos que provocan variaciones de su metabolismo, la proliferación de ciertos microorganismos, etc. Su variación a lo largo del año influye en el ecosistema fluvial, ya que determina la riqueza y abundancia de los organismos, los cuales desarrollan un patrón biológico adaptado a esos cambios.

- Cuando la temperatura aumenta, disminuye la concentración de oxígeno disuelto y si las aguas son deficientes en oxígeno, pueden ocasionar la muerte de especies acuáticas.

- La conductividad es una medida de las cargas iónicas que circulan dentro del agua. Proporciona la concentración de sales e iones (sales disociadas) presentes en el agua. Los iones más habituales hallados en las aguas naturales son sodio, calcio, magnesio, bicarbonato, sulfato y cloruro. Sus concentraciones presentan fuertes oscilaciones, desde bajas concentraciones en ríos de alta montaña hasta casos de mayor concentración. La concentración de sales en el agua depende de diversos factores, como el tipo de sustrato geológico. El incremento de la conductividad y, por lo tanto, de la salinidad del agua tiene importantes efectos sobre el ecosistema fluvial; a partir de concentraciones mayores de 1.500 mg/l de sales, se notan los efectos sobre la biota fluvial y, si se sobrepasan los 2.000 mg/l, se reduce fuertemente la biodiversidad dentro del agua.

- El oxígeno disuelto (OD) es un gas de gran importancia biológica que participa en un sinnúmero de reacciones químicas en los ecosistemas acuáticos. Todos los organismos heterotróficos dependen de una forma u otra del oxígeno para mantener los procesos metabólicos de producción de energía y de reproducción. Las principales fuentes de oxígeno para el agua son la atmósfera y la fotosíntesis; su pérdida se presenta por el consumo y la descomposición de materia orgánica (oxidación) y su fuga hacia la atmósfera, por la respiración de organismos acuáticos y por la oxidación de iones metálicos como, por ejemplo, el hierro y el manganeso.

- El pH es la medida de la concentración de ion hidrógeno en solución e indica el balance entre los ácidos (pH<7) y bases (pH>7) en el agua, siendo pH=7 neutro. El intervalo de concentración adecuado para la proliferación y desarrollo de la vida acuática es bastante estrecho: la fauna acuática se desarrolla preferentemente en un rango de 6,5 a 8,0; fuera de este rango, se reduce la diversidad por estrés fisiológico y se limita su reproducción (véase el cuadro 3.5).

Cuadro 3.5 Calidad del agua y valores de OD aceptables

Fuente: Stevens Institute of Technology & CIESE (2003)

Nivel de OD (en ppm)	Calidad del agua
0,0 – 4,0	Mala Algunas poblaciones de peces y macroinvertebrados empezarán a bajar.
4,1 – 7,9	Aceptable
8,0 – 12,0	Buena
12,0 +	Repita la prueba El agua puede airearse artificialmente.

El cuadro 3.6 incluye algunos efectos del pH sobre organismos acuáticos.

Cuadro 3.6 Calidad del agua y valores de pH aceptables

Fuente: Stevens Institute of Technology & CIESE 2003

Nivel de pH	Calidad del agua
Menos de 5,5	Mala: Muy ácida A los peces y otros organismos les será casi imposible sobrevivir.
5,5 – 6,4	Aceptable
6,5 – 7,5	Buena
7,6 – 8,5	Aceptable
Más de 8,6	Mala: Muy alcalina A los peces y otros organismos les puede ser casi imposible sobrevivir.

- La turbidez mide la capacidad del agua de dispersar la radiación solar por la presencia de partículas en suspensión, que pueden o no presentar color propio; provoca la reducción de intensidad de los rayos luminosos que penetran en el cuerpo de agua, influyendo en las características del ecosistema presente. Cuando las partículas en suspensión se sedimentan, forman bancos de lodo donde la digestión anaeróbica lleva a la formación de los gases metano y carbónico, principalmente, además de nitrógeno gaseoso y gas sulfhídrico .

- La temperatura afecta a la solubilidad del oxígeno en el agua; una mayor temperatura conlleva una menor solubilidad y viceversa. La solubilidad del oxígeno también se ve afectada por los incrementos en la salinidad, la cual tiene estrecha relación con la conductividad, por lo que este último parámetro es importante para caracterizar la calidad del agua. La

Cuadro 3.7 Efectos del pH sobre los organismos acuáticos

Fuente: Esteves (1998), extraído de CALIDAD DE AGUA EN EMBALSES, Moacyr https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/75/4/Unidade_2.pdf

Valores de pH	Efectos sobre los organismos acuáticos
11,5 – 12,0	Algunos <i>trichoptera</i> logran sobrevivir.
11,0 – 11,5	Efecto inmediato: letal para todas las especies de peces.
10,5 – 11,0	Letal para algunos <i>plecoptera</i> y <i>anisoptera (odonata)</i> ; <i>trichoptera</i> tiene una emergencia reducida.
10,0 – 10,5	Algunos <i>plecoptra</i> típicos y <i>ephemeroptera</i> sobreviven con la emergencia reducida.
9,0 – 10,0	Reduce la emergencia de algunos <i>plecoptera</i> .
8,0 – 9,0	Sin efecto aparente para los invertebrados.
7,0 – 8,0	7,0 es casi el límite inferior para la reproducción de <i>gammarus sp.</i> y tal vez para algunos <i>crustácea</i> .
6,5 – 7,0	Invertebrados relativamente normales excepto <i>crustácea</i> . Incluyendo la incidencia común de <i>mollusca</i> .
6,0 – 6,5	Población acuática diversificada; no ocurre la reproducción de <i>gammarus sp.</i> <i>Daphnia sp.</i> y tal vez de <i>crustácea</i> .
5,5 – 6,0	Los <i>mollusca</i> son raros.
5,0 – 5,5	Baja diversidad de invertebrados bentónicos, con ciertos <i>simuliidae</i> , <i>ephemeroptera</i> , <i>plecoptera</i> y <i>chironomidae</i> presentes en mayor número; letal para otros invertebrados, tales como algunos <i>ephemeroptera</i> .
4,5 – 5,0	Fauna béntica restringida, <i>ephemeroptera</i> reducidos; letal para muchos <i>plecoptera</i> típicos; inhibe la emergencia de ciertas larvas de <i>trichoptera</i> , <i>plecoptera</i> y <i>chironomidae</i> .
4,0 – 4,5	Se encuentran algunos <i>trichoptera</i> y <i>anisoptera (odonata)</i> en tales hábitats; ciertas larvas de <i>chironomidae</i> son dominantes.
3,5 – 4,0	Toda flora y fauna esta severamente restringida en número de especies.
3,0 – 3,5	Unos pocos tipos de invertebrados tales como ciertas larvas de <i>chironomidae</i> y <i>sialidae</i> .

relación entre los procesos de respiración y fotosíntesis afecta la concentración de dióxido de carbono en el agua, modificando el pH y su capacidad de *buffer* lo que, a su vez, altera la concentración y especies catiónicas del agua. Otra variable a considerar es la turbidez del agua, que en algunos casos podría limitar el desarrollo de las comunidades de microalgas bentónicas al disminuir la penetración de la luz (Servicio de Evaluación Ambiental, 2016, p. 28).

Caracterización en laboratorio

Las muestras a ser analizadas en laboratorio se tomarán siguiendo protocolos establecidos respecto a la naturaleza del material y el volumen a ser colectado. En cuanto a los parámetros para establecer la calidad del agua, se recomienda considerar los básicos sugeridos en las normativas para definir la aptitud de uso del agua, teniendo prioridad aquellos que permiten caracterizar el agua desde el punto de vista biótico. Los más importantes, además de los obtenidos *in situ*, son los siguientes:

- Nutrientes. Los principales nutrientes responsables del equilibrio de la biota acuática son el nitrógeno y el fósforo.
 - Nitrógeno. Los procesos de transferencia de este nutriente son extremadamente importantes para la productividad acuática. Los principales procesos

involucrados en el ciclo del nitrógeno son la nitrificación, la desnitrificación y la fijación biológica. El nitrógeno está presente en los ambientes acuáticos bajo varias formas –por ejemplo, nitrato (NO₃⁻), nitrito (NO₂⁻), amoníaco (NH₃), ion amoníaco (NH₄⁺), óxido nitroso (N₂O), nitrógeno molecular (N₂), nitrógeno orgánico disuelto (péptidos, purinas, aminas, aminoácidos, etc.) y nitrógeno orgánico particulado (bacterias, fitoplancton, zooplancton y sedimentos). Entre las diferentes formas, el nitrato, junto con el ion amoníaco, adquieren suma importancia en los ecosistemas acuáticos ya que representan las principales fuentes de nitrógeno para los productores primarios; en altas concentraciones, el nitrito es extremadamente tóxico para la mayoría de los organismos acuáticos.

Cuadro 3.8 Calidad del agua y valores de NO₃- N aceptables

Fuente: Stevens Institute of Technology & CIESE (2003)

Nivel de NO ₃ - N (en PPM)	Calidad del agua
0 – 1,0	Excelente
1,1 – 3,0	Buena
3,1 – 5,0	Aceptable
5,0 o más	Mala

— Fósforo. Es un elemento muy relevante si se considera la eutrofización artificial de los cuerpos de agua y su relación con el sistema biológico. En comparación con los demás nutrientes, el fósforo es el menos abundante y, por tanto, el factor más limitante en la productividad primaria. En ecosistemas acuáticos, el fósforo se encuentra bajo la forma de fosfato, ya sea en la forma iónica o en la forma compleja.

- Demanda química de oxígeno (DQO). Es la cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación de la materia orgánica de una muestra por medio de un agente químico, como el dicromato de potasio; su incremento puede deberse a vertidos de origen industrial.
- Hierro y manganeso. Ambos metales se originan en la disolución de compuestos de rocas y suelos. El hierro es un elemento de particular interés para la vida en el agua. Es el elemento esencial para la síntesis de los pigmentos respiratorios de muchos animales (la hemoglobina) y forma parte de numerosas enzimas. El hierro también es esencial para la fotosíntesis ya que forma parte al menos de 2 citocromos que transfieren electrones durante este proceso. El hierro se encuentra en las formas insolubles (Fe^{+3}) y disuelta (Fe^{+2}). Aunque menos abundante y, cuando presente, asociado al hierro, el manganeso también se presenta en la forma insoluble (Mn^{+4}) y disuelta (Mn^{+2}). El hierro, al igual que el manganeso, pueden constituir un factor limitante para la vida de ciertas bacterias que lo utilizan como material oxidable, transformando el carbonato ferroso en férrico. Para otros organismos acuáticos, sobre todo vegetales, el hierro es un elemento esencial. Las algas necesitan concentraciones bajas de hierro para su máxima productividad, pero, si la concentración de manganeso es alta, requieren también mayores cantidades de hierro.
- Coliformes totales y fecales. La determinación de la presencia del grupo coliforme se constituye en un indicio de polución, así como de la eficiencia y la purificación y potabilidad del agua.

Las normativas para establecer la calidad del agua incluyen, en general, más de 70 parámetros; por tanto, se reitera que será necesario seleccionar los básicos que permitan caracterizar el agua tomando en cuenta que esta puede presentar contaminación por alguna actividad antrópica aguas arriba del sitio de la presa.

De forma referencial, el cuadro 3.10 ofrece un listado de parámetros y sus límites admisibles tomado una clasificación general de cuerpos de agua extraída del “Reglamento en materia de contaminación hídrica de la Ley de Medio Ambiente de Bolivia”:

- Clase “A”. Aguas naturales de máxima calidad, que las habilita como agua potable para consumo humano sin ningún tratamiento previo o con simple desinfección bacteriológica en los casos necesarios verificados por laboratorio.
- Clase “B”. Aguas de utilidad general que para consumo humano requieren tratamiento físico y desinfección bacteriológica.
- Clase “C”. Aguas de utilidad general que para ser habilitadas para consumo humano requieren tratamiento físico-químico completo y desinfección bacteriológica.

Cuadro 3.9 Calidad del agua y valores de fosfato aceptables

Fuente: Stevens Institute of Technology & CIESE (2003)

Nivel de fosfato (en PPM)	Calidad del agua
0 – 1,0	Excelente
1,1 – 4,0	Buena
4,1 – 9,9	Aceptable
10,0 o más	Mala

- Sólidos suspendidos. Se generan a partir de la erosión de los suelos, el detritus orgánico y el plancton. Los sólidos suspendidos, tales como el limo, la arena y el virus, son generalmente responsables de impurezas visibles. Cuando son abundantes, pueden formar capas de barro que alteran el hábitat y el ciclo de ciertas especies.
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) del agua. Es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica por descomposición microbiana aeróbica. La DBO es un parámetro de fundamental importancia en la caracterización del grado de contaminación orgánica de un cuerpo de agua. La DBO_5 , se define como el oxígeno consumido por microorganismos para oxidar biológicamente la materia orgánica, cuando se incuba una muestra en la oscuridad durante 5 días a 20 °C.

Cuadro 3.10 Calidad del agua y valores de DBO5 aceptables

Fuente: Stevens Institute of Technology & CIESE (2003)

Nivel de fosfato (en PPM)	Calidad del agua
1 – 2	Muy buena No hay mucho desecho orgánico presente en la muestra de agua
3 – 5	Aceptable Moderadamente limpia
6 – 9	Mala Algo contaminada. Generalmente indica que hay materia orgánica presente y que las bacterias están descomponiendo este desecho
10 o más	Muy mala Muy contaminada. Contiene desecho orgánico

Cuadro 3.11 Parámetros básicos de calidad de agua y su clasificación

Fuente: Bolivia. Ley N° 1333 del 17 de abril de 1992. Decreto Supremo N° 24176. Reglamento en materia de Contaminación Hídrica. Disponible <http://bibliotecadelagua.sirh.gob.bo/docs/pdf/208.pdf> (Extraída parcialmente del Anexo A-1)

N°	Parametros	Unidad	Clase "A"	Clase "B"	Clase "C"	Clase "D"
1	pH		6,0 a 8,5	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0
2	Temperatura	°C	±3°C de C receptor	±3°C de C receptor	±3°C de C receptor	±3°C de C receptor
3	Sólidos disueltos totales	mg/l	1000	1000	1500	1500
4	Aceites y grasas	mg/l	Ausentes	Ausente	0,3	1
5	DBO ₅	mg/l	<2	<5	<20	<30
6	DQO	mg/l	<5	<10	<40	<60
7	NMP Colifecales NMP	N/100ml	<50 y <5 en 80 % de muestras	<1000 y <200 en 80 % de muestras	<5000 y <1000 en 80 % de muestras	<50000 y <5000 en 80 % de muestras
10	Oxígeno disuelto	mg/l	>80 % sat.	>70 % sat.	>60 % sat.	>50 % sat.
11	Turbidez	UNT	<10	<50	<100 <2000***	<200 - 10000***
12	Sólidos sedimentables	mg/l - ml/l	<10 mg/l	<30 mg/l -0,1 ml/l	<50 mg/l -<1 ml/l	100 - <1 ml/l
14	Amoníaco	mg/l	0,05 c. NH ₃	1,0 c. NH ₃	2 c. NH ₃	4 c. NH ₃
33	Fierro soluble	mg/l	0,3 c. Fe	0,3 c. Fe	1,0 c. Fe	1,0 c. Fe
34	Fluoruros	mg/l	0,6-1,7 c. F	0,6-1,7 c. F	0,6-1,7 c. F	0,6-1,7 c. F
35	Fostato total	mg/l	0,4 c. Orthofosf.	0,5 c. Orthofosf.	1,0 c. Orthofosf.	1,0 c. Orthofosf.
37	Manganeso	mg/l	0,5 c. Mn	1,0 c. Mn	1,0 c. Mn	1,0 c. Mn
41	Nitrato	mg/l	20,0 c. NO ₃	50,0 c. NO ₃	50,0 c. NO ₃	50,0 c. NO ₃
42	Nitrito	mg/l	<1,0 c. N	1,0 c. N	1,0 c. N	1,0 c. N
43	Nitrógeno total	mg/l	5 c. N	12 c. N	12 c. N	12 c. N

Nota: *** Río en crecida
C receptor = Cuerpo receptor

- Clase "D". Aguas de calidad mínima que para consumo humano, en los casos extremos de necesidad pública, requieren un proceso inicial de presedimentación, pues pueden tener una elevada turbiedad por un elevado contenido de sólidos en suspensión, y posteriormente, un tratamiento físico-químico completo y desinfección bacteriológica especial contra larvas y parásitos intestinales.

Los resultados de las muestras analizadas se contrastarán con la normativa vigente de cada país y se determinará el tipo al que corresponden; si hubiera contaminación, se identificará específicamente el tipo y la fuente.

Caracterización ecológica

La caracterización ecológica es fundamental para la determinación de caudales ecológicos. A partir de ella, se establecerá la importancia del río y los posibles impactos de su aprovechamiento; por tanto, será necesario determinar las comunidades que forman el ecosistema en el río y las riberas y las especies que las integran (nativas e introducidas).

Si se determina que las especies son relevantes en el entorno estudiado, se procederá a definir las especies indicadoras, las cuales servirán de base para la aplicación de métodos hidráulicos e hidrobiológicos para el establecimiento de caudales ecológicos.

La caracterización ecológica puede realizarse inicialmente a partir de la información generada en el estudio ambiental del proyecto o llevarse a cabo en coordinación con el área biótica del equipo ambiental para obtener la información necesaria a fin de establecer los caudales ecológicos.

Caracterización de ecosistemas acuáticos

La caracterización ecológica del ecosistema acuático incluye el estudio de las comunidades y poblaciones de la biota en el ecosistema fluvial; en el caso de las comunidades, se requiere conocer su composición taxonómica, riqueza y abundancia, mientras que, en las poblaciones, se busca establecer la abundancia de sus individuos, las épocas y los sitios de reproducción, la estructura de tallas de juveniles y adultos, y la biomasa o su estado de condición física, entre otros. Las comunidades y poblaciones que conforman los

ecosistemas ocupan diferentes mesohábitats y presentan una estructura espacial y temporal dinámica, producto de sus ciclos de vida y de variables físicas y químicas del ambiente.

En un cauce, se pueden encontrar comunidades bentónicas (microalgas bentónicas, macrofitas y macroinvertebrados) o pelágicas (fauna íctica). Además, es posible encontrar avifauna u otras especies terrestres (p. ej., mamíferos, reptiles o anfibios) que coexisten en el medio acuático y que deben ser caracterizadas. En general, la caracterización de la fauna íctica incluye el perifiton-fitoplancton-zooplancton, macroinvertebrados y peces.

● Perifiton, fitoplancton y zooplancton.

- El perifiton es una comunidad compleja de microbiota (algas, bacterias, hongos, animales, detritos orgánicos e inorgánicos) adherida a un sustrato, el cual puede ser orgánico o inorgánico.
- El fitoplancton es un grupo de organismos autotróficos, productores primarios por excelencia de los cuerpos de agua, e incluyen algas, protozoos y cianobacterias. Son responsables de la oxigenación de los ecosistemas acuáticos, además de la regulación de las comunidades de zooplancton, macroinvertebrados y peces herbívoros, por ser su principal recurso alimenticio. Dentro de su medio, juegan un papel importante en la dinámica de los compuestos orgánicos y son

utilizados como excelentes bioindicadores de la calidad del agua por presentar individuos, e incluso grupos, sensibles al cambio de las condiciones, principalmente fisicoquímicas, dependiendo de la composición, riqueza y abundancia de los grupos de organismos.

- El zooplancton. Desde el punto de vista trófico, está representado por especies de varios phila: *protozoarios*, *celenterados*, *rotíferos*, *briozoarios* y, sobre todo, por algunos grupos de crustáceos, como los *cladoceros*, los *copépodos* y los *ostracodos*, y también por las larvas de muchos insectos, los huevos y las larvas de peces. La mayoría de los organismos que pertenecen al zooplancton se alimentan de otros animales más pequeños.

- Macroinvertebrados acuáticos. Son aquellos invertebrados con un tamaño superior a 500 µm, entre los que se incluyen animales como esponjas, planarias, sanguijuelas, oligoquetos, moluscos o crustáceos. No obstante, el grupo de invertebrados acuáticos más ampliamente distribuido en las aguas dulces es el de los insectos, los cuales son acuáticos en su estado de huevos y larvas, mientras que los adultos suelen ser terrestres. El grupo de macroinvertebrados acuáticos comprende a animales que alcanzan hasta 1mm de tamaño, pertenecientes a los taxones *mollusca*, *Oligochaeta*, *Nematoda*, *Hirudinea* y *Crustácea* (*Amphipoda*, *Isopoda* y *Dacapoda*) principalmente. Los cambios en la composición y

Figura 3.12
Comunidades bentónicas

Fuente: Educación Ambiental en República Dominicana (s.f.) <http://www.jmarcano.com/nociones/fresh2.html>

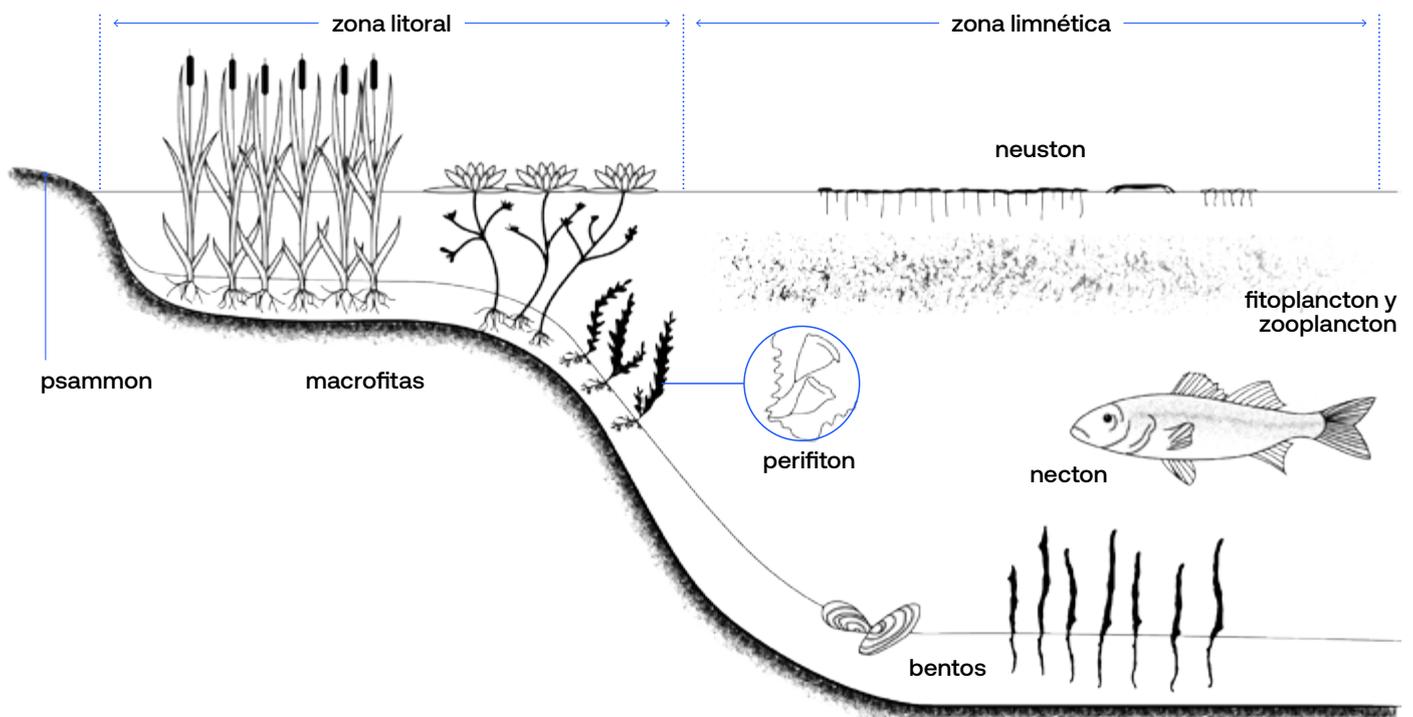


Figura 3.13
Macroinvertebrados acuáticos

Fuente: Dra. Mariana Beatriz Jofré, Universidad Nacional de San Luis. Presentación Indicadores Biológicos de Calidad Ambiental. <https://slideplayer.es/slide/1632016/>

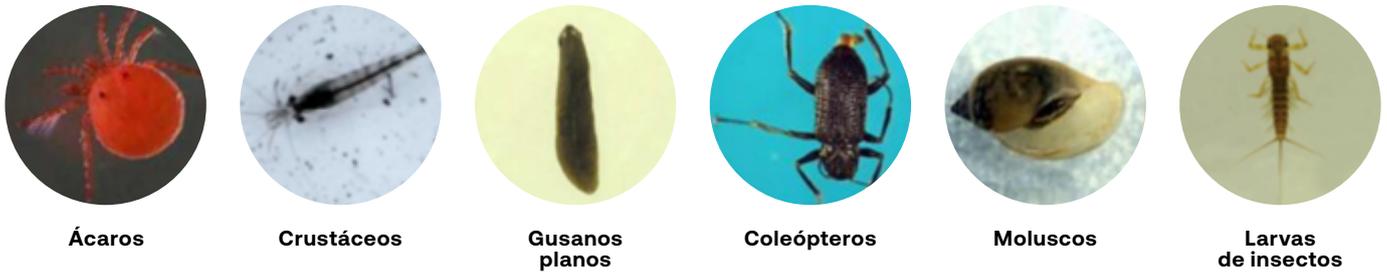
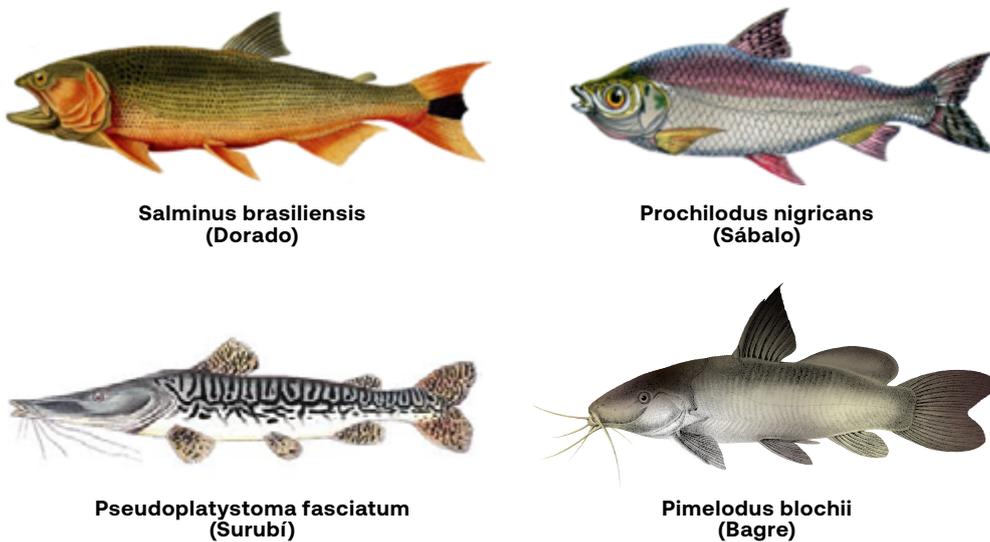


Figura 3.14
Especies de peces indicadoras

Fuente: wikipedia.org



abundancia de la comunidad de macroinvertebrados pueden ser utilizados para conocer el estado de conservación de los cuerpos acuáticos, convirtiéndolos a estos en bioindicadores. La composición y densidad de macroinvertebrados está condicionada por las precipitaciones, la altitud, la pendiente, el oxígeno, la velocidad de la corriente, la conductividad eléctrica, los sólidos suspendidos y el sustrato.

- **Ictiofauna.** Es el conjunto de especies de peces que existen en una determinada región biogeográfica. Los peces son organismos altamente diversificados, de los que existen especies alguívoras (consumen algas), detritívoras (consumen materia orgánica, como hojarasca), insectívoras (consumen insectos), planctófagas (consumen plancton) y piscívoras (consumen otros peces). Los peces ocupan múltiples espacios en un cuerpo de agua, desde la superficie hasta el fondo y nadan en sentido del flujo o a contracorriente.

La presencia y abundancia de peces, e incluso su tamaño, puede causar importantes efectos sobre otros niveles tróficos y, finalmente, sobre el funcionamiento del ecosistema.

Definir las características del ecosistema fluvial es trascendental ya que a partir de ellas se pueden inferir los impactos que ocasionaría la implementación del proyecto y la mejor forma de mitigarlos con los caudales ecológicos. La caracterización debe realizarse inicialmente en base a información secundaria y, posteriormente, a través de trabajo de campo, cuyo alcance será definido, según su importancia y necesidad, por el especialista en biología.

La evaluación del ecosistema acuático se deberá realizar mediante muestreos en campo de la fauna y flora acuática representativa, presente en épocas seca y húmeda, y, si es posible, en época de transición, de acuerdo a los pasos descritos a continuación.

Caracterización de los puntos de muestreo en campo

- Se localizarán los sitios de muestreo como mínimo en: i) el sitio donde se prevé construir la presa; ii) el sitio donde se espera, en casos de proyectos hidroeléctricos, que se realice la restitución del caudal, y iii) el sitio donde el río debería volver a un estado normal o donde se considere adecuado según la evaluación del biólogo. Los sitios de muestreo pueden incrementarse según requerimiento y deben ser georeferenciados y fotografiados.
- Se registrarán las características del entorno físico en los sitios de muestreo seleccionados (condiciones meteorológicas, vegetación circundante, geomorfología y actividades antrópicas) mediante observaciones directas y fotografías.
- En cada sitio de muestreo se identificarán puntos o hábitats representativos del río (rápido, canal, poza, etc.) en los cuales se realizarán los respectivos registros de parámetros físico-químicos y muestreos biológicos. Se recalca que los muestreos de calidad del agua deben ser realizados en los mismos sitios en los que se hace el muestreo biológico.
- Se caracterizará cada punto o hábitat representativo del río en función de parámetros físico-químicos, estructura granulométrica, profundidad del agua y velocidad de la corriente.
- Los parámetros físico-químicos (T, pH, conductividad, oxígeno disuelto y turbidez) serán registrados utilizando un equipo portátil previamente calibrado.
- Para la determinación de la estructura granulométrica, se considerará un transecto de 50 metros lineales en el cauce del río para cada punto.
- Se hará un relevamiento de la sección del río en el sitio de muestreo, midiendo adicionalmente su profundidad y velocidad, empleando un molinete o micromolinete. La velocidad media se puede calcular en función de la profundidad o tirante de la siguiente forma: i) si el tirante es menor de 70 cm, se mide a una altura sobre el lecho del 40 % de la profundidad del agua; ii) si el tirante está entre 50-150 cm, se hacen dos mediciones, al 20 % y al 80 %, y se determina el promedio; iii) cuando la profundidad es mayor a 1,5 m, se realizan tres mediciones, al 20 %, 60 % y 80 %, utilizando el “método de tres puntos” (se promedian las del 20 % y 80 %, y el resultado se promedia con la del 60 %, utilizando metodologías conocidas como la de los tres puntos). De no ser posibles los aforos con molinete, se podrá recurrir a otros métodos coordinados con la ingeniería del proyecto, como, por ejemplo, batimetrías que vayan acompañadas del muestreo biológico.

Muestreos o colectas en los puntos representativos del río

- La fauna y flora acuática más representativa en cada punto de muestreo (perifiton, fitoplancton, zooplancton, macroinvertebrados y peces) será identificada a través de métodos de colecta.
- Se utilizarán redes de colecta específicas para cada grupo de organismos (redes de fitoplancton, zooplancton y red Surber para macroinvertebrados), tomando en cuenta la abertura de malla para su colecta. Se realizarán tres muestreos de cada grupo de organismos en cada hábitat representativo, a manera de réplica.
- Para fauna íctica, las colectas se realizarán según protocolos ya establecidos; en los puntos de muestreo, se sugiere realizar entrevistas semiestructuradas a los miembros de comunidades cercanas que desarrollen actividades de pesca, tanto de subsistencia como comercial, a fin de obtener información adicional sobre las épocas de pesca, de migración, etc.
- La vegetación acuática (macrófitas) será evaluada tomando en cuenta puntos de muestreo de 1m² a lo largo de tres transectos, desde la orilla hacia el interior del cauce del río. Además, se procederá al reconocimiento y cuantificación de especies vegetales en cada punto.

Análisis de muestras y resultados obtenidos

Se deben considerar las siguientes actividades:

- Análisis de datos de campo (descripciones detalladas del entorno de cada sitio de muestreo).
- Evaluaciones taxonómicas de las muestras colectadas (identificación taxonómica a nivel familia o género utilizando claves y descripciones de los organismos).
- Determinación de la diversidad, aspectos ecológicos y abundancia relativa de los organismos colectados en cada hábitat representativo del río.
- Aplicación del índice de bioindicación (BMWP- *Biological Monitoring Working Party score*) para determinación de la calidad del agua y la elaboración del mapa. Como ejemplo, se muestran los puntajes adoptados y la clasificación de calidad de agua para Colombia en los cuadros 3.11 y 3.12.
- Listado de especies de importancia pesquera y su estado de conservación.
- Correlación de datos biológicos y físico-químicos (ACP u otros estadísticos).

Cuadro 3.12

Puntaje de las familias de macroinvertebrados acuáticos para el índice BMWP en Colombia (Roldán, 2003)

Fuente: Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica, Gabriel Roldán-Pérez <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v40n155/v40n155a07.pdf>

Familias	Puntaje
<i>Anomalopsychidae, Atriptectididae, Blepharoceridae, Calamoceratidae, Ptilodactylidae, Chordodidae, Gomphidae, Hidridae, Lampyridae, Lymnessiidae, Odontoceridae, Oligoneuriidae, Perlidae, Polythoridae, Psephenidae</i>	10
<i>Ampullariidae, Dytiscidae, Ephemeridae, Euthyplociidae, Gyrimidae, Hydrobiosidae, Leptophlebiidae, Philopotamidae, Polycentropodidae, Xiphocentronidae.</i>	9
<i>Gerridae, Hebridae, Helicopsychidae, Hydrobiidae, Leptoceridae, Lestidae, Palaemonidae, Pleidae, Pseudothelphusidae, Saldidae, Simuliidae, Veliidae</i>	8
<i>Baetidae, Caenidae, Calopterygidae, Coenagrionidae, Corixidae, Dixidae, Dryopidae, Glossosomatidae, Hyalellidae, Hydroptilidae, Hydropsychidae, Leptohiphidae, Naucoridae, Notonectidae, Planariidae, Psychodidae, Scirtidae</i>	7
<i>Aeshnidae, Ancylidae, Corydalidae, Elmidae, Libellulidae, Limnichidae, Lutrochidae, Megapodagrionidae, Sialidae, Staphylinidae</i>	6
<i>Belostomatidae, Gelastocoridae, Hydropsychidae, Mesoveliidae, Nepidae, Planorbiidae, Pyralidae, Tabanidae, Thiaridae</i>	5
<i>Chrysomelidae, Stratiomyidae, Haliplidae, Empididae, Dolycopodidae, Sphaeridae, Lymnaeidae, Hydraenidae, Hydrometridae, Noteridae</i>	4
<i>Ceratopogonidae, Glossiphoniidae, Cyclobdellidae, Hydrophilidae, Physidae, Tipulidae</i>	3
<i>Culicidae, Chironomidae, Muscidae, Sciomyzidae</i>	2
<i>Tubificidae</i>	1

Cuadro 3.13

Clases de calidad de agua, valores BMWP en Colombia.

Significados y colores para representaciones cartográficas.

Fuente: Bioindicación de la calidad del agua en Colombia – Uso del método BMWP/Col., Gabriel Alfonso Roldán Pérez https://books.google.com.bo/books?id=ZEjgIKZTF2UC&pg=PA32&lpg=PA32&dq=Clases+de+calidad+de+agua,+valores+BMWP+en+Colombia.+Significados+y+colores+para+representaciones+cartográficas.&source=bl&ots=IMk_ZAFxKH&sig=ACfU3U2sSsMhaDrLQI353vh_j7x6ETf2rw&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwiOzMKsnrLhAhVnNfKkHZAQBLEQ6AEwBxoECAkQAQ#v=onepage&q=Clases%20de%20calidad%20de%20agua%20C%20valores%20BMWP%20en%20Colombia.%20Significados%20y%20colores%20para%20representaciones%20cartográficas.&f=false

Clase	Calidad	BMWP / Col.	Significado	Color
I	Buena	> 150, 101-120	Aguas muy limpias a limpias	Azul
II	Aceptable	61-100	Aguas ligeramente contaminadas	Verde
III	Dudosa	36-60	Aguas moderadamente contaminadas	Amarillo
IV	Crítica	16-35	Aguas muy contaminadas	Naranja
V	Muy crítica	< 15	Aguas fuertemente contaminadas	Rojo

Caracterización de zonas ribereñas

La zona ribereña es un área de transición entre la zona terrestre y el ecosistema acuático. Se trata de áreas a través de las cuales las aguas superficiales y subsuperficiales se conectan con territorios adyacentes. En estas zonas es donde se produce y controla significativamente el intercambio de energía y materia entre un ecosistema terrestre y uno acuático. En ella se encuentran hábitats vegetales y comunidades a lo largo de las márgenes y orillas de un río, caracterizados por la presencia de plantas hidrófilas.

La vegetación ribereña provee al medio biótico refugio y alimento para numerosos animales acuáticos, y sombra, que es un elemento importante del sistema de regulación de temperatura del cauce de agua. Además, genera hábitats acuáticos y terrestres, con la presencia de humedales o bofedales, y filtra los nutrientes. En el medio físico, la vegetación ribereña estabiliza las márgenes y lamina las crecidas. La alteración del régimen natural de un río (variación de caudales ordinarios y de crecidas) afecta a la vegetación ribereña, más aún cuando su subsistencia depende más del régimen hidrológico del río que de las napas subterráneas.

Entre las informaciones a incluir sobre la vegetación ribereña figuran la descripción del grado de cubierta de las orillas, la estructura de la cubierta (presenta árboles, carece de vegetación, etc.), la naturalidad y la complejidad de la cubierta (intervención antrópica), el grado de alteración del cauce, el tipo de sustrato, el tipo de vegetación y sus requerimientos, el régimen de inundaciones, el porcentaje de vegetación acuática, los sectores que proveen sombra y las secciones típicas del cauce. La profundidad de la descripción debe ser mayor si, en conjunto, la vegetación ribereña se constituye en el elemento indicador de la biodiversidad del río que se desea conservar.

Servicios ambientales

Los servicios ambientales son aquellos beneficios que proveen los ecosistemas a las personas para que estas, a su vez, hagan uso de ellos con el fin de mejorar su calidad de vida. Los ecosistemas proveen a la sociedad de una amplia gama de servicios para su subsistencia.

Los beneficios que proveen dichos servicios pueden clasificarse de distintas formas. Por ejemplo, en función de la relación entre el ecosistema y la provisión del servicio, estos beneficios pueden ser de dos tipos:

- Directos: producción de agua o alimentos (servicios de aprovisionamiento), regulación de ciclos hídricos o de degradación de suelos, de plagas y enfermedades (servicios de regulación).
- Indirectos: se relacionan con el funcionamiento de procesos del ecosistema que generan los servicios directos, como el proceso de fotosíntesis y el ciclo de nutrientes, entre otros.

Otra clasificación en función del tipo de servicio que presta el ecosistema es la siguiente:

- Servicios de soporte, que son aquellos necesarios para la producción de los demás servicios ambientales:
 - Formación del suelo (conservación y fertilidad).
 - Ciclos biogeoquímicos (a través de medios geológicos, biológicos y químicos, como N, P, etc.).
 - Ciclo hidrológico (movimiento y distribución del agua en el espacio y el tiempo en sus diferentes fases).
 - Producción primaria (fotosíntesis, quimosíntesis).
- Servicios de regulación, que corresponden a los beneficios obtenidos de la regulación de los procesos de los ecosistemas:
 - Regulación del clima (a través de la cobertura vegetal y factores climáticos).

- Enfermedades (presencia, abundancia y movimiento de patógenos y sus vectores).
- Regulación del agua (los ecosistemas influyen en el ciclo hidrológico, la cuenca, la recarga de acuíferos y el agua disponible).
- Calidad del aire (intercambio de gases, partículas y sustancias químicas entre los ecosistemas y el aire).
- Erosión, translocación y sedimentación (regulación de tasas de erosión, translocación de partículas por agua y aire, y deposición en cuerpos de agua y planicies de inundación).
- Calidad del agua (los ecosistemas filtran, limpian y descomponen compuestos químicos y detritos por medio de procesos realizados en el suelo).
- Riesgos naturales (la presencia de ciertos ecosistemas permite amortiguar los efectos negativos de eventos hidrometeorológicos extremos).
- Polinización y control de plagas (la presencia en los ecosistemas naturales de especies polinizadoras, depredadores de plagas y plagas regula la productividad del ecosistema y de los agroecosistemas).
- Servicios de suministro, que son aquellos obtenidos de los ecosistemas y que generan recursos materiales, productos y bienes:
 - Alimentos (los derivados de las plantas, los animales, los hongos y los microorganismos).
 - Combustibles (los derivados de los tejidos leñosos de las plantas, las excretas de los animales y los gases inflamables producto de la descomposición).
 - Fibras y pieles (para vestimenta, techos, redes, etc.).
 - Plantas y compuestos medicinales y de herbolaria (productos y subproductos de origen natural empleados en el tratamiento de enfermedades).
 - Recursos genéticos (derivados de la flora, la fauna, los hongos y los microorganismos, utilizados para el mejoramiento de productos alimenticios o farmacéuticos, para uso en la bioremediación, en la producción de compuestos químicos, etc.).
 - Agua.
- Servicios culturales, que son beneficios no materiales obtenidos de los ecosistemas.
 - Culturales (valores asignados por el hombre a los ecosistemas y sus componentes).

- Espirituales y religiosos (valores asignados al ecosistema con relación a un poder divino).
- Recreación y ecoturismo (esparcimiento).
- Escénicos.
- Científico (estudio de la biodiversidad con fines de investigación).

Los principales ecosistemas proveedores de servicios ambientales son los ecosistemas forestales (bosques primarios o secundarios, plantaciones forestales y sistemas agroforestales, entre otros) y otros ecosistemas generalmente asociados al bosque (humedales, pastizales naturales, nacientes).

El papel de los bosques en el mantenimiento de los regímenes hidrológicos es de suma importancia. El agua es vital para la sobrevivencia humana y la biodiversidad, por tanto la protección de los recursos hídricos desde la parte alta de las cuencas es imprescindible. Las reservas hídricas (sitios con cobertura forestal o bosques) protegen la capacidad generadora de agua de una cuenca al controlar la erosión edáfica y evitar la colmatación de las corrientes de agua, los embalses, los canales y los sistemas

de irrigación; también sirven para reducir la incidencia y la escala de las inundaciones, y proporcionan flujo constante de agua durante períodos secos.

Los humedales almacenan la escorrentía, recargan los acuíferos y digieren los residuos orgánicos, mientras que los bosques proveen sombra a los ríos y arroyos y previenen la erosión. El más conocido y estudiado servicio de aprovisionamiento del páramo es el agua dulce, el cual aporta hasta el 80 % del agua dulce de grandes ciudades como Quito y Bogotá (Mena Vásquez, P., A. Castillo, S. Flores, R. Hofstede, C. Josse, S. Lasso, G. Medina, N. Ochoa y D. Ortiz (Eds.). 2011. Páramo. Paisaje estudiado, habitado, manejado e institucionalizado. EcoCiencia/Abya-Yala/ ECOBONA. Quito).

Los suelos, como parte de los ecosistemas terrestres, cumplen importantes servicios ecosistémicos. Los principales son el soporte y suministro de nutrientes a las plantas, de ahí que la degradación del suelo esté considerada como el mayor problema ambiental que amenaza la producción mundial de alimentos. En el suelo además, se realiza una parte importante de los ciclos biogeoquímicos necesarios para el reciclaje de los compuestos orgánicos.

Cuadro 3.14 Algunos ecosistemas y los servicios que prestan

Fuente: Introducción a los servicios ambientales, Antony Challenger 2009 https://tabasco.gob.mx/sites/all/files/sites/sernapam.tabasco.gob.mx/files/dpcc_introduccion_servicios_ambientales.pdf

Servicios ecológicos	Captura de agua	Conservación de la calidad del agua	Captura de carbono	Sumidero de carbono	Conservación física del suelo	Conservación de la biodiversidad	Medio para ecoturismo	Amortiguar eventos hidrometeorológicos	Protección de riberas	Conservación de acervos genéticos	Belleza paisajística	Conservación de la fertilidad del suelo	Formación y recuperación de suelos	Filtración de contaminantes del aire, del suelo y del agua	Regulación del clima	Mantenimiento de ciclos minerales, de gases y del agua	Protección de litorales	Provisión de hábitats para especies silvestres de valor ecológico o comercial
Humedal (Tular y popal)		XX	X	XXX		XX	XX	XX	XX	X	XX			X				
Manglar		XX	X	XX	XX	XX	XX	XX	X	XX	XX		XX	XXX		XX	XXX	XXX
Vegetación de dunas costeras					XX	X		XX		X	X						XXX	
Bosque de galería		XX	X	X	XX	X	X	X	XXX	XX	XX	X	X	XXX		XX		X
Bosque de encino (encinar tropical)	XX	X	XX	X	X	X	X	X	X	X	XX	XXX	XX	XX	XX	XX		X
Bosque de coníferas-encinos	XX	X	XX	XX	XX	XX	XX	X	X	XX	XX		XX	XX	XX	XX		XX
Selva baja caducifolia	X		X	X	X	XX	X		X	XX	X	X	X	X	X	XX		XX
Bosque mesófilo de montaña	XXX	X	XXX	XX	XX	XXX	XX	X	X	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX		XX
Selva húmeda	XX	X	XX	X	XX	XXX	XX	X	X	XX	XX	XXX	X	XX	XX	XX		XX

El suelo también permite captar el agua superficial por infiltración para lograr la recarga de acuíferos, actuando además como filtro de contaminantes, lo cual permite que el agua que llega a los estratos profundos tenga mejor calidad.

En áreas urbanas, los suelos no impermeabilizados, además de permitir la recarga de acuíferos, reducen el escurrimiento directo convirtiéndose en reductores de crecidas. Adicionalmente, el suelo se constituye en proveedor de servicios para materiales de construcción.

Para que los bosques y el suelo puedan preservar sus funciones, es necesario garantizar su contacto con el agua y el aire del entorno, conservando las propiedades que regulan su calidad.

La variabilidad hidrológica, la degradación del suelo y los cambios en su uso están generando alteraciones irreversibles en la infraestructura verde y los servicios ambientales ligados a estos ecosistemas.

En el estudio de caudales ecológicos no se pretende llegar a una valoración de los servicios ambientales, pero sí se requiere valorar su importancia e identificar aquellos relacionados estrictamente con el agua (disponibilidad) y la necesidad de conservación de un ecosistema específico. Otros servicios ambientales, como los culturales, por ejemplo, deberán considerarse como usuarios adicionales del sistema ligados directamente al aprovechamiento humano. La evaluación incluirá la situación actual y con proyecto a nivel micro y macro.

A nivel macro

Se deberá realizar un análisis de los posibles servicios ambientales que, en la situación sin proyecto, podría prestar el ecosistema, tomando en cuenta la cuenca, la geomorfología, los tipos de suelos, la cobertura vegetal, los usos del suelo, la climatología de la zona (temperatura, precipitación) y los pisos ecológicos característicos. La tarea mencionada puede realizarse en base a mapas temáticos desarrollados como parte del estudio hidrológico, geológico y ambiental del proyecto. Con la información mencionada, se podrá inferir de forma preliminar si existen servicios ambientales relevantes que se podrían alterar con la implementación del proyecto. En el cuadro 3.14 se presentan, como ejemplo, algunos ecosistemas y los servicios que prestan.

A nivel micro

Con base en las referencias de posibles servicios ambientales en el área en estudio a nivel macro, se realiza una evaluación a nivel micro aguas abajo de la presa con el objetivo de identificar específicamente el tipo de servicio ambiental y su relevancia, para, posteriormente, establecer el caudal requerido para mantenerlo.

Uno de los principales servicios que suelen verse afectados aguas abajo de un embalse son los páramos o bofedales, que conservan la biodiversidad a lo largo del año y, además, se constituyen en reservorios naturales de agua. En el caso específico mencionado, se deberá estimar el caudal que almacena este ecosistema, controlando los ingresos y salidas, a fin de establecer el caudal requerido para preservarlo en la situación con proyecto.

Determinación de especies indicadoras

Una especie indicadora es un organismo cuya presencia, ausencia o abundancia refleja una condición ambiental específica, es decir que las especies indicadoras poseen características particulares, como sensibilidad a contaminantes, distribución, abundancia y éxito reproductivo, que permiten representar el estado de conservación de algunas especies u otros parámetros ambientales.

Los grupos de especies indicadoras se pueden clasificar en:

- Especies indicadoras de cambios ambientales. Se encuentran altamente relacionadas con condiciones ambientales particulares; por tanto, se utilizan para determinar la presencia de contaminantes o el efecto de otras perturbaciones provocadas por el ser humano (p. ej., líquenes, invertebrados, peces y aves).
- Especies indicadoras poblacionales. Permiten estimar las variaciones poblacionales de otras especies con las que coexiste. Es el caso de la relación depredador-presa.
- Especies indicadoras de biodiversidad. Están relacionadas con áreas de alta riqueza de especies y se caracterizan por tener una amplia distribución, pueden ser especies especializadas o generalistas, estar bien documentadas y ser fáciles de estudiar (p. ej., aves, mariposas, coleópteros y plantas).

En el caso particular de caudales ecológicos, las especies que representan el ecosistema fluvial son de mayor relevancia dentro de un contexto de grupos de indicadores poblacionales y de biodiversidad.

Las especies tienen requerimientos físicos, químicos, de estructura o tipo del hábitat y de relaciones con otras especies. A cada especie o población, le corresponden determinados límites de esas condiciones ambientales en los cuales pueden sobrevivir (límites máximos), crecer (intermedios) y reproducirse (límites más estrechos). En general, cuanto más estrechos son sus límites de tolerancia, mayor es su utilidad como indicador biológico. Los indicadores biológicos o especies bioindicadoras deben ser, en general, abundantes, muy sensibles al medio de vida,

fáciles y rápidas de identificar, bien estudiadas en su ecología y ciclo biológico, y con poca movilidad.²

Los peces tienen una gran importancia en la ecología acuática, dado que son los animales estructuradores del ecosistema acuático y presentan los mayores requerimientos de caudal, por lo que, si se aseguran las condiciones para satisfacer sus requerimientos, se permite la conservación de otras especies (p. ej., invertebrados). Para la selección de especies indicadoras, se sugiere considerar los siguientes criterios:

- Las especies indicadoras pueden ser especies ícticas, macroinvertebrados, aves, mamíferos, anfibios y especies vegetales cuyos ciclos de vida pueden depender directamente del río; por tanto, la evaluación de expertos en biología para su definición es fundamental.
- Es común considerar especies de fauna íctica debido a que son organismos indicadores ideales por su abundancia en los ecosistemas acuáticos, son fáciles de capturar y de identificar, y existe una amplia información sobre las historias de vida de muchas especies. Las comunidades generalmente comprenden una amplia variedad de especies que representan diferentes niveles tróficos (incluyendo especies que consumen alimentos tanto de origen acuático como terrestre). Son los organismos mejor estudiados, y se encuentran desde pequeños cursos de agua hasta en ecosistemas con diferentes grados de contaminación. Se sugiere priorizar las especies categorizadas en grado de amenaza (en peligro crítico, en peligro o vulnerables) o casi amenazadas, o, en su defecto, las nativas. Se recomienda elegir por lo menos dos especies de características diferentes (pelágicas o bentónicas), de modo que se cubran todos los espectros del hábitat (Velázquez Velázquez E. y Vega Cendejas, M. E., 2004).
- Si no se encuentran especies ícticas indicadoras, se pueden considerar como indicadores a macroinvertebrados. Estos tienen una especial importancia en los ecosistemas acuáticos al constituir el componente de biomasa animal más importante en muchos tramos de ríos y desempeñar un papel fundamental en la transferencia de energía desde los recursos basales hacia los consumidores superiores de las redes tróficas; es decir, que los macroinvertebrados acuáticos van a consumir la materia orgánica fabricada en el río por los organismos fotosintéticos, como algas o briófitos, y la materia orgánica procedente del ecosistema terrestre, fundamentalmente del bosque de ribera, y la van a transferir a los grandes vertebrados del ecosistema, representando la principal fuente de alimento de estos, de manera que la alteración de la comunidad de macroinvertebrados de los ecosistemas fluviales va a afectar directamente a animales como peces, aves acuáticas o mamíferos semiacuáticos (Ladrera Fernández, 2012).

- En caso de que el área del proyecto se encuentre en humedales, es posible emplear como especies indicadoras las aves acuáticas. Las características físicas de los humedales (tamaño, forma, perfil de profundidades, presencia y distribución de vegetación emergente, etc.) influyen mucho sobre la diversidad y abundancia de aves acuáticas; los humedales más grandes albergan más especies de aves y las que se encuentran en los sitios más pequeños suelen ser las especies más abundantes (Green y Figuerola, s.f.).
- La zona ribereña puede considerarse también como una especie indicadora y aplicarse a una especie particular o a un conjunto de vegetación ribereña. En materia de conservación, la vegetación ribereña destaca como un ecosistema de alta productividad primaria, que constituye hábitat de fauna tanto acuática como terrestre con problemas de conservación. Se consideran cuando: i) la vegetación ribereña presenta un alto valor ecológico, donde al menos una de sus funciones ecosistémicas es vital para mantener el ecosistema y su dinámica fluvial; ii) cuando existen especies terrestres, anfibias o acuáticas que se encuentran en categoría de conservación y que pasan gran parte de sus etapas de desarrollo y ciclos de vida en la zona ribereña, y iii) cuando la alteración de la geomorfología del río puede ocasionar grandes cambios en el ecosistema, alterando los hábitats de las especies que lo habitan, o cuando el descenso del nivel freático en la zona ribereña puede alterar a mediano o largo plazo la supervivencia y la diversidad del bosque de ribera.

La información general de las especies indicadoras deberá ser compilada de fuentes secundarias en esta etapa; posteriormente, de acuerdo a los requerimientos del método de cálculo de caudales ecológicos a emplear, se profundizará su estudio.

Caracterización antrópica

La caracterización de los usos antrópicos es necesaria para evaluar si existen actividades relevantes en el área en estudio que pudieran alterar las características naturales del río, tanto en régimen como en calidad. En relación a los usos del agua, se podrán distinguir: actividades productivas (usos agrícola, acuícola, industrial, minero, etc.), y actividades *in situ* (actividades socioeconómicas, navegación, recreación, etc.), siendo de importancia, principalmente en calidad, las actividades productivas. Se reitera que los usos existentes, en cuanto a cantidad de agua, se deben considerar como de origen antrópico, no como caudales ecológicos.

² Fuente: Breve Enciclopedia del Ambiente, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – CONICET Mendoza, Argentina. Ed. Volkheimer, W; et. al. s/f Bioindicadores(=Indicadores biológicos), Alba Puig (<http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/Bioindic.htm>)

Conclusiones generales de la caracterización del sistema hídrico

Las conclusiones de la caracterización del sistema hídrico deberían proveer información básica para el conocimiento del área en estudio e insumos para la aplicación del procedimiento para la determinación de la mejor metodología para el cálculo de caudales ambientales.

La información básica obtenida en el diagnóstico, en el acápite de conclusiones, debería ir relacionada adicionalmente con los posibles impactos que podría generar el proyecto, los cuales se mencionan de forma genérica en el capítulo 2, e ir acompañada de un resumen, sintetizado en una matriz con los datos específicos resumidos en la figura 3.15.

Figura 3.15
Resumen de la información más importante del diagnóstico del sistema hídrico

Fuente: Elaboración propia





Etapa III. Selección del grupo de metodologías de cálculo de caudales ecológicos recomendables

Introducción

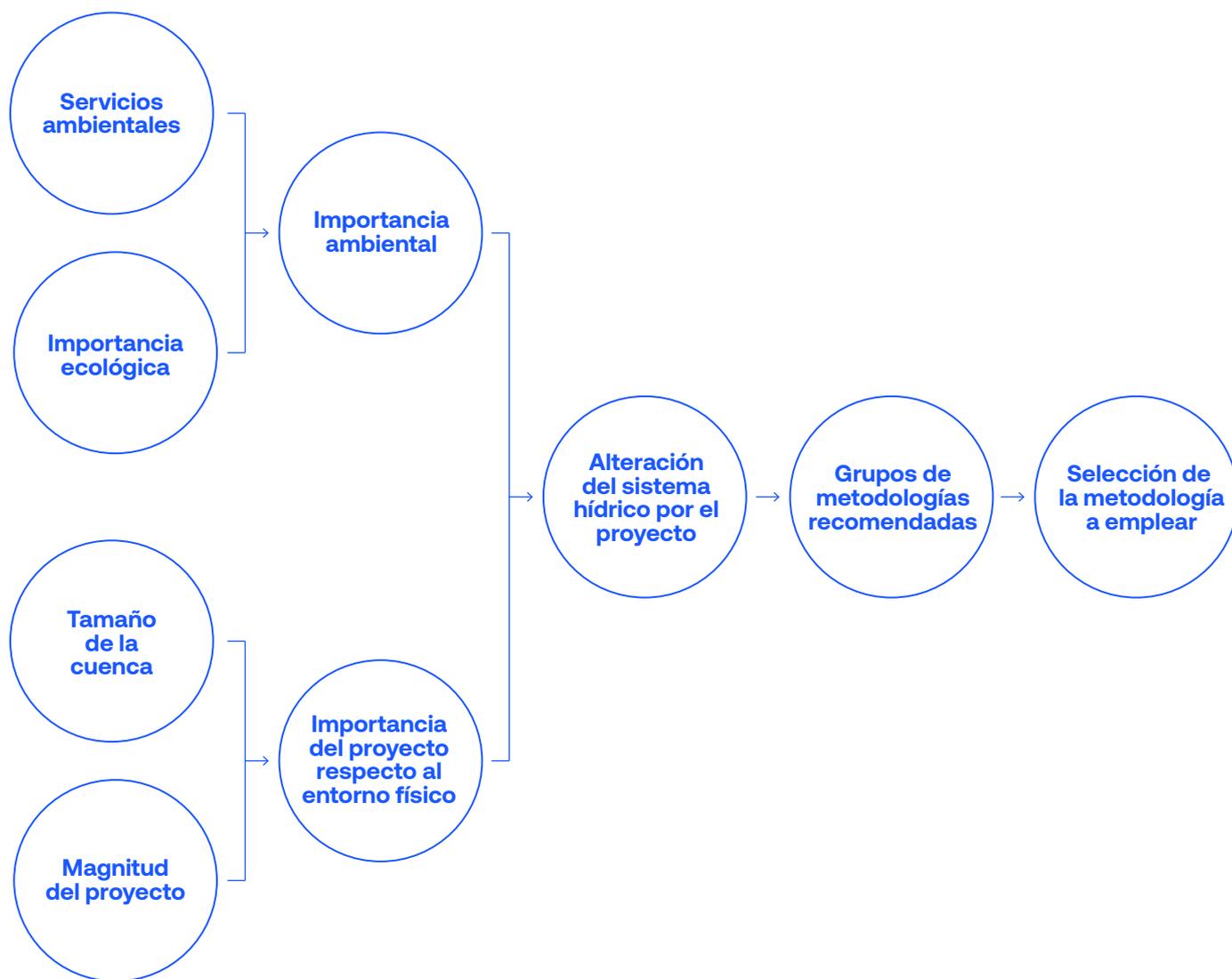
El procedimiento para la determinación de la metodología más adecuada para el cálculo de caudales ecológicos considera en conjunto el impacto del proyecto en el medio dependiente del agua y su régimen y la forma más adecuada de mitigarlo, con caudales ecológicos acordes a la importancia ambiental de la zona de estudio.

La información básica para la aplicación de la metodología es la generada en la etapa I, dedicada a la descripción del proyecto, y la etapa II, sobre la caracterización del sistema hídrico, las cuales proporcionan los insumos para su análisis, calificación y posterior clasificación, lo que permite finalmente la recomendación sobre la metodología más adecuada para el cálculo de caudales ecológicos.

El procedimiento propuesto no responde a una formulación matemática, sino a una serie de criterios que dirigen a una evaluación que, por último, provee la metodología de cálculo de caudales ecológicos más recomendable. Dado que en el proceso se manejan muchas variables que llevan inmersas diferentes tipos de incertidumbres, se recomienda considerar, dentro de cada grupo de metodologías propuestas, el de mayor exigencia técnica.

Figura 3.16
Actividades de la etapa III del procedimiento de selección de la Metodología de Cálculo de Caudales

Fuente: Elaboración propia



Procedimiento

El procedimiento para el establecimiento del grupo de metodologías adecuadas para determinar los caudales ecológicos comienza con la determinación de los índices de importancia del proyecto respecto al entorno físico e importancia ambiental, que, a su vez, permiten establecer la alteración al sistema hídrico por el proyecto, índice que direcciona al grupo de metodologías que se pueden emplear. Es necesario aclarar que, en la presente guía, cuando se habla de alteración al sistema hídrico, se engloba a los componentes físicos y bióticos de un curso de agua.

Importancia del proyecto respecto al ambiente físico

La importancia del proyecto respecto al ambiente físico se establece considerando las características del proyecto en cuanto al volumen embalsado y la altura de la presa, así como el tamaño de la cuenca que es aprovechada.

Características fundamentales del proyecto

La metodología considera la diferenciación de proyectos que emplean presas como base para la regulación de caudales en función de los impactos que generan aguas abajo. De forma genérica, se diferencian dos grupos de proyectos: el primero corresponde a proyectos de riego y de abastecimiento urbano, donde el uso es consuntivo, y el segundo abarca proyectos de generación hidroeléctrica, donde existe restitución del recurso.

Si bien la clasificación de la magnitud del proyecto se realiza en función del volumen del embalse y la altura de la presa, se debe incluir la diferenciación mencionada en el análisis de los impactos que genera el embalse para todo tipo de proyecto.

En el cuadro 3.15 se presenta la calificación de la magnitud del proyecto, donde A representa proyectos grandes de mayor impacto con dificultosa mitigación; B, proyectos considerados medios con impactos entre altos y medios y con posibilidad de mitigación efectiva, y C, proyectos menores con impactos bajos mitigables.

Cuadro 3.15 Calificación de la magnitud del proyecto

Fuente: Elaboración propia

Calificación	Volumen del embalse (hm ³)	Altura de la presa (m)	Descripción
A	Mayor de 60	Mayor de 30	Alta
B	1,5 – 60	12 – 30	Media
C	Menor de 1,5	Menor de 12	Baja

La combinación del volumen del embalse y la altura de la presa es muy importante. Pueden existir presas de gran altura, con pequeños vasos, y presas de altura reducida, con embalses grandes, debido a que dependen de su ubicación geográfica en la cuenca; es decir, conforme a la topografía del vaso. Por tanto, no es posible establecer una relación lineal entre ambas, razón por la cual no siempre es posible que se cumplan simultáneamente las condiciones de volumen y altura para la calificación de la magnitud del proyecto. De ahí que, cuando las características del proyecto ubican el volumen del embalse en un rango y la altura en otro, se recomienda privilegiar el volumen del embalse para establecer la calificación de la magnitud del proyecto (la clasificación planteada ha mostrado una adecuada correlación en pruebas realizadas con 270 presas en Bolivia).

La altura de la presa, desde el punto de vista biótico, constituye un parámetro fundamental de análisis por dos motivos: presas con alturas mayores de 20 m, en condiciones climáticas favorables, suelen desarrollar una estratificación térmica más acentuada mientras las variaciones climáticas diarias y estacionales sean más marcadas; además, si la obra de toma se encuentra en la zona del hipolimnion, será mayor la probabilidad de que el agua que se descargue sea anóxica, es decir, que presente deficiencia de oxígeno y que la temperatura del agua desfogada sea menor a la natural, generando impactos no solo al régimen de caudales, sino también a su calidad.

Lo mencionado deberá ser analizado con mayor énfasis en proyectos hidroeléctricos, donde se prevé la restitución de caudales, situación en la cual la alteración de régimen, frecuencia, magnitud y calidad de agua es más acentuada.

Características de la cuenca de aporte

El tamaño de la cuenca hasta el sitio de implementación del proyecto muestra también la importancia de las intervenciones en el entorno físico y proporciona una idea de los caudales a ser aprovechados y de los posibles impactos que puede generar el proyecto. Su calificación, ilustrada en el cuadro 3.16, presenta seis rangos de tamaños de cuenca.

Cuadro 3.16 Calificación de la cuenca según su área de aporte

Fuente: Elaboración propia

Calificación	Tamaño de la cuenca (km ²)	Descripción
A	< 25	Muy pequeña
B	25 a 250	Pequeña
C	250 a 500	Intermedia-pequeña
D	500 a 2500	Intermedia-grande
E	2500 a 5000	Grande
F	> 5000	Muy grande

De forma genérica, las muy pequeñas y pequeñas (A y B) corresponderían a la parte alta de las cuencas, tendrían mayores pendientes y una alta red de drenaje que permitiría una respuesta rápida de la cuenca a las precipitaciones en cursos de montaña; en cursos de llanura, se trataría también de la parte alta de la cuenca, pero con pendientes menores y respuesta más lenta a las lluvias. El comportamiento señalado se podría extender a cuencas intermedias (C y D), aunque con menores pendientes, en las que se podría presentar erosión y, en cierto grado, sedimentación, y con una red de drenaje compuesta y de características diferentes; las cuencas grandes y muy grandes (E y F) tendrían un comportamiento más complejo debido a su extensa área. En estos casos, los proyectos estarían ubicados en las partes medias o bajas de las cuencas, con usos de suelo variados, donde el proceso de sedimentación cobraría mayor importancia, al igual que la magnitud de los caudales, y el grado de aprovechamiento de los recursos hídricos podría ser proporcional al tamaño de la cuenca.

Determinación de la importancia del proyecto respecto al entorno físico

El indicador de importancia del proyecto respecto al entorno físico muestra la relación entre el área de intervención y el tamaño del proyecto. Su calificación se muestra en el cuadro 3.17.

Cuadro 3.17 Calificación de la importancia del proyecto respecto al entorno físico

Fuente: Elaboración propia

Tamaño de la cuenca (km ²)		Magnitud del proyecto		
		A	B	C
< 25	A	-	Media	Baja
25 a 250	B	Media	Media	Baja
250 a 500	C	Alta	Media	Baja
500 a 2500	D	Alta	Media	Baja
2500 a 5000	E	Alta	Media	Baja
> 5000	F	Muy alta	Alta	Baja

Una importancia muy alta representa un proyecto de grandes proporciones (presas altas y de alta capacidad de almacenamiento), que aprovechará los caudales que se generan en una cuenca muy grande, con impactos elevados y en los que la regulación de los caudales implicará cambios en el régimen de las aguas difíciles de mitigar. Una importancia alta está relacionada con proyectos también grandes, pero con captaciones menores, aunque no dejan de ser relevantes. La importancia media considera el aprovechamiento de cuencas desde muy pequeñas hasta grandes, con proyectos de tamaño medio o grande, que generan impactos posibles de mitigar. Finalmente,

una importancia baja está relacionada con proyectos menores aplicables a diferentes tamaños de cuencas, pero con impactos mitigables. Nótese que pueden diseñarse proyectos menores en cuencas mayores, con reducido aprovechamiento del recurso.

Importancia ambiental

La importancia ambiental califica la trascendencia ecológica de la biodiversidad en el río y los servicios ambientales que podría presentar este curso para otros ecosistemas o para el ser humano en relación a la preservación del agua. Este indicador es el más relevante del procedimiento para la determinación de la metodología más adecuada para el cálculo de caudales ecológicos debido a que establece implícitamente la sensibilidad del ambiente a ser intervenido con el proyecto. La información empleada para la definición de los aspectos mencionados se extrae de las conclusiones de los estudios de la etapa II.

Importancia ecológica

La importancia ecológica se define en función de la caracterización ecológica realizada en la etapa II, donde, si la situación lo requiere, se definen una o varias especies indicadoras u objetivo. Se califica según los criterios expuestos en el cuadro 3.18.

Cuadro 3.18 Calificación del indicador de importancia ecológica

Fuente: Elaboración propia

Calificación	Criterio
A	En el curso existe alguna especie de importancia regional que se encuentra bajo algún estado de protección según listados internacionales (hábitat poco o nada intervenido).
B	En el curso existen especies nativas (hábitat poco o nada intervenido).
C	En el curso existen especies nativas e introducidas (hábitat con alguna intervención o leves alteraciones).
D	En el curso se encuentran especies menores de bajo interés; por tanto, alteraciones en el régimen no generarán impacto (hábitat poco o nada intervenido con baja riqueza ecológica o hábitat intervenido).

Servicios ambientales

Los servicios ambientales, identificados también en la etapa II, incluyen los requeridos para el mantenimiento de ecosistemas de interés o para la conservación del agua como recurso; no incluyen otro tipo de servicios ambientales. Se califican de acuerdo a los criterios que figuran en el cuadro 3.19.

Cuadro 3.19
Calificación del indicador de servicios ambientales

Fuente: Elaboración propia

Calificación	Criterio
A	El recurso alimenta reservorios de agua naturales, como páramos o bofedales, que mantienen el hábitat y se consideran reservas de agua (almacenamiento, recarga de acuíferos, etc.), y además mantienen ecosistemas de interés.
B	Las especies presentes en el ecosistema tienen importancia para preservar el medio o son fuente potencial de aprovechamiento (medicinal, económico).
C	El recurso no se constituye en un elemento de regulación vital (no presta un servicio ambiental saliente).

La calificación A representa un servicio ambiental de importancia que imprescindiblemente se debe considerar en el análisis de los caudales ecológicos; la calificación B representa una importancia media del servicio que presta el ecosistema; y la C muestra una calificación baja o nula para el servicio del ecosistema.

Calificación de la importancia ambiental

La importancia ambiental de la zona en la cual se implementará el proyecto y que incluye un área de influencia específica se define considerando la importancia ecológica y la relevancia de los servicios ambientales conforme al cuadro 3.20.

Cuadro 3.20
Calificación de la importancia ambiental

Fuente: Elaboración propia

Importancia ecológica	Servicios ambientales		
	A	B	C
A	Alta	Alta	Alta
B	Alta	Media	Baja
C	Media	Media	Baja
D	Media	Baja	Baja

Una importancia ambiental alta muestra que el área a intervenir presenta una riqueza ecológica significativa y servicios ambientales que requieren ser preservados por ser esenciales para la biodiversidad y para la conservación del recurso agua como fuente para el hombre y para el ecosistema; una importancia ambiental media sugiere relevancia ecológica de la zona o servicios ambientales de interés, pero no considerados esenciales; finalmente, una importancia ecológica baja, manifiesta una baja riqueza ecológica y servicios ambientales no significativos.

Alteración del sistema hídrico por el proyecto

La alteración del sistema hídrico por el proyecto mide el impacto del mismo sobre el medio físico-biótico, y permite establecer las metodologías más adecuadas para la determinación de caudales ecológicos. Se determina a partir de la importancia ambiental y la importancia del proyecto respecto al entorno siguiendo la clasificación del cuadro 3.21.

Cuadro 3.21
Calificación de la alteración del sistema hídrico (físico-biótico) por el proyecto

Fuente: Elaboración propia

Importancia ambiental	Importancia del proyecto respecto al entorno físico		
	Alta	Media	Baja
Alta	Alta	Alta	Media
Media	Alta	Media	Baja
Baja	Media	Media	Baja

Una alteración alta del sistema hídrico (físico-biótico) muestra la necesidad de un análisis exhaustivo debido a que los impactos del proyecto serán de mucha importancia sobre el medio biótico y el entorno físico, que podrían requerir medidas de mitigación adicionales a los caudales ecológicos; una alteración media tiene implicancias en el medio biótico y físico, pero de características mitigables con el caudal ecológico; una alteración baja implica la inexistencia de biodiversidad o servicios ambientales de relevancia y, por tanto, un caudal mínimo circulante debería ser suficiente para mantener el funcionamiento del río.

Grupos de metodologías de cálculo de caudales ecológicos recomendadas

A partir de la valoración de la alteración del sistema hídrico (físico-biótico) con el proyecto, establecida con base en la importancia del proyecto respecto al entorno físico y la importancia ambiental del curso, es posible determinar qué grupo de métodos se ajusta mejor a los requerimientos del ecosistema y del proyecto.

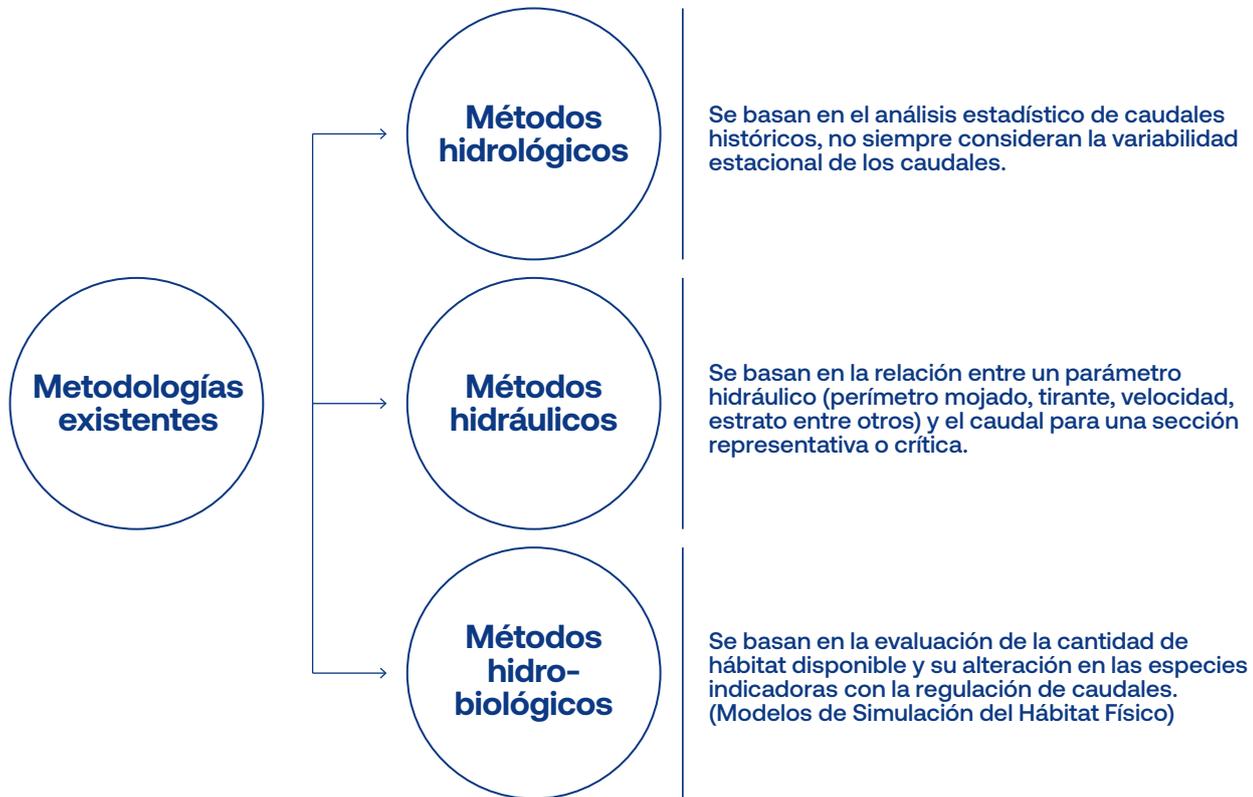
La identificación del grupo de métodos a utilizar considera que, a mayor valoración del ecosistema, se requieren métodos capaces de abordar de forma más completa aspectos bióticos relacionados con las alteraciones que sufra el cuerpo de agua. Asimismo, dentro de cada grupo de métodos, es necesario identificar aquel que mejor se acomode a las características especiales del río en estudio, tomando en cuenta la riqueza en biodiversidad y las características morfológicas del mismo.

Los grupos de métodos para el cálculo de caudales ecológicos existentes son los expuestos en la figura 3.17.

En el cuadro 3.22, se presentan los grupos de métodos recomendados según la alteración del sistema hídrico (físico-biótico).

Figura 3.17
Grupos de metodologías para el cálculo de caudales ecológicos

Fuente: Elaboración propia



Cuadro 3.22
Grupo de métodos de cálculo de caudales ecológicos recomendados de forma preliminar

Fuente: Elaboración propia

Alteración del sistema hídrico (físico-biótico) por el proyecto	Grupo de métodos de cálculo de caudales ecológicos recomendado de forma preliminar
Alta	Requiere el empleo de métodos hidrobiológicos o de simulación del hábitat , que conceptualmente consideran los requerimientos de agua, en cantidad y calidad, de los componentes de la biodiversidad que se desea preservar (p. ej., peces, bofedales, etc.), ligados a necesidades de profundidades de agua, velocidades del flujo y sustrato. En situaciones de importancia ambiental alta, serán necesarios estudios detallados de los componentes considerados y sus necesidades de agua, tomando en cuenta la variabilidad mensual de caudales (es imprescindible la participación de expertos en biología en todo el proceso de análisis y de especialistas en hidrología, hidráulica y calidad de agua). El énfasis del análisis es cantidad, calidad y régimen del flujo.
Media	Requiere el empleo de métodos de simulación del hábitat, métodos hidrobiológicos (completos o simplificados) o métodos hidráulicos que consideren los caudales que necesitan las especies indicadoras, en cantidad y calidad, distribuidos en el cauce, cumpliendo sus requerimientos de profundidad de agua o perímetro mojado (es necesaria la participación de un especialista en biología que defina las especies indicadoras y sus requerimientos, un especialista en modelación hidráulica y un especialista en hidrología). El énfasis del análisis es en la cantidad, calidad y régimen del flujo.
Baja	Requiere el empleo de métodos hidrológicos , basados en el manejo estadístico de información de caudales. El umbral mínimo de caudales ecológicos es del 10 % del caudal medio anual; sin embargo, se recomienda, en todos los métodos a emplear, considerar el régimen mensual de caudales (es necesaria la participación de un especialista en hidrología).

Nota. A fin de establecer los caudales ecológicos con variabilidad mensual en los métodos hidráulicos e hidrobiológicos, será necesario aplicar inicialmente un método hidrológico y, a partir de sus resultados, analizar los caudales ecológicos obtenidos por la metodología que corresponda, ya sea del grupo hidráulico o hidrobiológico, o de simulación del hábitat.

Consideraciones generales para la selección del método a emplear

Una vez identificado el grupo de métodos, el siguiente paso consiste en escoger el método final a aplicar dentro de cada grupo en función de la especie indicadora (si corresponde) y de los impactos que podría generar el proyecto; luego, se deberá analizar la información disponible, la información que se requiere complementar y las limitaciones para generar información en casos particulares que pudieran limitar o condicionar los resultados de la aplicación del método.

En los cuadros 3.22, 3.23 y 3.24 se presentan características generales de los métodos, la información requerida y la experiencia necesaria para los técnicos que apliquen las metodologías, consideraciones importantes, ajustes por tipo de proyecto y sugerencias sobre algunos métodos específicos a aplicar (citados según el grado de importancia de menor a mayor). Sin embargo, se resalta que lo relevante es conocer el grupo de metodologías que se pueden aplicar, ya que existen más de 280 y deben ser elegidas en función del criterio del equipo que estudie los caudales ecológicos.

Cuadro 3.23 Métodos hidrológicos

Fuente: Elaboración propia

Métodos hidrológicos	Características	<p>Premisa: Se considera que las comunidades ribereñas han evolucionado sometidas a determinados tipos de regímenes de caudales, de manera que los organismos de estas comunidades están adaptados a las variaciones estacionales propias de dichos regímenes. Estas variaciones “naturales” afectan el comportamiento, el ciclo biológico y la producción de las poblaciones.</p> <p>Los métodos propuestos en la presente guía consideran la variabilidad del hidrograma y el ecosistema fluvial como un conjunto en el cual se busca preservar los caudales que mantienen los procesos fluviales en el río. No se recomienda el empleo de un solo caudal ecológico para todo el año por lo expuesto anteriormente.</p>
	Información y experiencia requerida para la aplicación del método	<p>Datos de caudales diarios para un periodo mínimo de 20 años. En algunos casos se pueden emplear datos mensuales.</p> <p>Nivel de experiencia para su aplicación: especialista en hidrología.</p> <p>Tipo de trabajo: solo en gabinete.</p>
	Consideraciones importantes	<p>Su implementación está limitada a la disponibilidad de información.</p>
	Ajustes por tipo de proyecto	<p>Es independiente del tipo de proyecto.</p>
Métodos recomendados	Q10 % con variación mensual	<p>Características: aplicable a zonas con importancia ambiental baja, con mínima riqueza ecológica o en zonas intervenidas.</p> <p>Datos: caudales mensuales (registro mínimo de 20 años).</p> <p>Consideraciones importantes: debería aplicarse a cursos sin interés ecológico. No requiere el análisis de las posibles alteraciones de la calidad del agua en la situación con proyecto.</p>
	Método de la curva de permanencia	<p>Características: aplicable a zonas con importancia ambiental baja, con presencia de especies de bajo interés ecológico.</p> <p>El método parte del análisis de curva de duración de caudales por mes, a fin de determinar el caudal del 95 % de permanencia, el cual se constituiría en caudal ecológico.</p> <p>Datos: caudales diarios o mensuales (registro mínimo de 20 años).</p> <p>Consideraciones importantes: no requiere análisis de las posibles alteraciones de la calidad del agua en la situación con proyecto.</p>
	7q10	<p>Características: aplicable a zonas con importancia ambiental baja. La determinación de caudales ecológicos se basa en caudales medios mínimos observados durante un intervalo de tiempo de siete días, con un periodo de retorno de diez años.</p> <p>Datos: caudales diarios mínimos o caudales diarios medios (Chiang y Jonhson, 1976; c/f Pinilla Agudelo, G., et. al, 2014).</p> <p>Consideraciones importantes: no requiere el análisis de las posibles alteraciones de la calidad del agua en la situación con proyecto.</p>

Continúa →

Métodos recomendados	Tennant	<p>Características: aplicable a zonas con importancia ambiental baja, con algunas especies ícticas.</p> <p>El método divide el año en un periodo seco y otro húmedo, para los cuales Tennant propuso caudales expresados como porcentajes del caudal medio anual, relacionándolos con grados de conservación. Se determinó que el hábitat comenzaba a degradarse cuando el flujo era inferior al 10 % del caudal medio anual, criterio asociado a una velocidad media de 0,25 m/s y una profundidad media de 0,3 m; para su aplicación se estudian tres variables consideradas fundamentales en la capacidad de acogida del medio para las especies piscícolas: el porcentaje de perímetro mojado con respecto al ancho del lecho, la profundidad y la velocidad media.</p> <p>Datos: caudales mensuales (registro mínimo de 20 años)</p> <p>Consideraciones importantes: se debe adecuar al hemisferio en el cual se realiza el cálculo al considerar las diferentes épocas características del año. Se recomienda su aplicación en cursos en los que hay presencia de peces, con mínima importancia ecológica, pero que aún pueden preservarse empleando el método. No requiere el análisis de las posibles alteraciones de la calidad del agua en la situación con proyecto.</p>
-----------------------------	----------------	---

Cuadro 3.24 Métodos hidráulicos

Fuente: Elaboración propia

Métodos hidráulicos	Características	<p>Premisa: se considera que variables hidráulicas simples, como el perímetro mojado o la profundidad máxima, constituyen factores limitantes en la biota del cauce.</p> <p>Si bien este método está enmarcado dentro de una conceptualización ecológica, esto no quiere decir que únicamente sea posible implementarlo para la especie indicadora para la cual fue desarrollado. Por ejemplo, es posible incluir el transporte de sedimentos, incorporando el esfuerzo de corte, y las zonas ribereñas, encontrando el perímetro mojado suficiente para estas en esa sección en particular.</p> <p>Lo más usual, al utilizar el método hidráulico, es determinar el parámetro más apropiado para cada especie indicadora en una sección de control elegida.</p> <p>Si se emplean varias secciones que representen la morfología del cauce enlazadas a las necesidades de una o más especies indicadoras, el método hidráulico se transforma en un método multisección, que permite analizar los parámetros hidráulicos relevantes en un área más amplia para las especies consideradas.</p>
	Información y experiencia requerida para la aplicación del método	<p>Datos: curvas de preferencia de las especies indicadoras que incluyan variables hidráulicas relacionadas con sus necesidades de profundidad, velocidad y sustrato; secciones transversales del río en un tramo limitado o topografía detallada en un tramo de influencia en función del método que se selecciona según la especie objetivo y tipo de cauce; caudales de partida que pueden establecerse a partir de un método hidrológico.</p> <p>Nivel de experiencia: especialista en biología y especialista en hidráulica, con apoyo de un especialista en hidrología.</p> <p>Tipo de trabajo: en gabinete y campo.</p>
	Consideraciones importantes	<p>El método hidráulico presenta problemas en su aplicación en cursos de baja pendiente donde –sobre todo en época seca– el flujo no escurre en un solo cauce definido (ríos trenzados) porque las curvas de caudal y el parámetro hidráulico elegido tienen problemas de representación gráfica y de significación plena del comportamiento del cauce.</p> <p>Las secciones del río, de las cuales depende el método, son sensibles a la variación morfológica de los cauces a lo largo del año, por lo cual es necesario que la selección de las mismas sea realizada de forma conjunta por especialistas en biología e hidráulica.</p> <p>En función de las especies indicadoras u objetivo seleccionadas, se deben establecer los parámetros hidráulicos que se quieren verificar; en algunos casos, se requerirá solamente del perímetro mojado. Para peces, por ejemplo, será necesario considerar la velocidad del flujo, la profundidad y el sustrato.</p>
	Ajustes por tipo de proyecto	<p>El método del perímetro mojado no se recomienda para proyectos hidroeléctricos debido a que es necesario analizar el efecto hidráulico de la restitución de los caudales turbinados. Sin embargo, es posible aplicar el método de múltiples secciones, tomando en cuenta en el análisis secciones anteriores y posteriores a los sitios de restitución de caudal.</p> <p>Para la aplicación del método de múltiples transectos, se debe considerar el análisis hasta el sitio donde se estima que los efectos de la regulación de los caudales no serán significativos.</p> <p>Si bien, en rigor, los métodos hidráulicos no consideran la calidad del agua, es necesario incorporar un análisis del efecto del embalse en la calidad del agua desfogada.</p>

Continúa →

Métodos recomendados	Método del perímetro mojado	<p>Características: asume que la integridad del hábitat está directamente relacionada con el área húmeda del mismo. Para ello, se construyen curvas de descarga versus perímetro mojado mostrando cómo crece rápidamente el perímetro mojado a medida que aumenta la descarga hasta un cierto punto de inflexión, donde el perímetro crece a una tasa menor. El caudal recomendado es aquel que se acerca al punto de inflexión, ya que se asume que este es el punto óptimo para el desove de peces o para la producción de invertebrados bentónicos.</p> <p>Datos: caudales obtenidos de aforos, una sección del río, tipo de sustrato y referencias de una curva de preferencia de la especie indicadora.</p> <p>Consideraciones importantes: el análisis se limita a una sección y no es representativa del comportamiento del tramo en estudio. Su aplicación se limita a cursos con riqueza ecológica entre baja y media. En cursos donde no es posible obtener más secciones, se aplica principalmente cuando las especies indicadoras son macroinvertebrados. Si bien el método no lo requiere, es importante incluir un análisis de las posibles alteraciones en la calidad del agua en la situación con proyecto.</p>
Método de múltiples transectos (<i>multiple transect methods</i>)	<p>características: se trata de una ampliación del método del perímetro mojado, utilizando varias secciones en un río o la topografía completa del tramo de un río para la definición de caudales ecológicos. Considera la variabilidad de caudales y el consecuente cambio de variables hidráulicas de importancia ecológica. El análisis hidráulico puede ser complementado con el empleo de modelos matemáticos que proveen parámetros hidráulicos de interés en diferentes escenarios de caudales.</p> <p>Datos: caudales de aforos o caudales de partida (pueden obtenerse con un método hidrológico), diferentes secciones en el río (en secciones de diferentes características), tipo de sustrato e información sobre requerimientos de las especies indicadoras.</p> <p>Consideraciones importantes: se recomienda su aplicación en cursos donde la importancia ambiental es media, hasta el sitio donde la influencia de la regulación de caudales sea mínima. Se aplica cuando las especies indicadoras son ícticas (peces). Si bien el método no lo requiere, es importante incluir un análisis de las posibles alteraciones en la calidad del agua en la situación con proyecto.</p>	
Métodos hidráulicos de simulación compleja o hidrobiológicos simplificados	<p>Características: se trata de métodos considerados híbridos entre los hidráulicos e hidrobiológicos debido a que consideran parámetros hidráulicos, como profundidad del flujo, velocidad u otros, relacionados con los requerimientos de las especies indicadoras en sus diferentes etapas de vida. Se apoyan en simulaciones hidráulicas, que proveen información de parámetros hidráulicos específicos que deben ser aceptables para las especies indicadoras.</p> <p>Datos: caudales de aforos u obtenidos con algún método hidrológico, características del sustrato, topobatimetría de las secciones seleccionadas o topografía del tramo en estudio, y rangos de parámetros hidráulicos del flujo requeridos por las especies indicadoras.</p> <p>Consideraciones importantes: se aplican en cursos de importancia ambiental media y cuando las especies indicadoras tienen mayores requerimientos del curso de agua, que deben ser verificados a través de parámetros hidráulicos adicionales al perímetro mojado. Además del biólogo, es imprescindible el concurso de un especialista en modelación hidráulica y el apoyo de un hidrólogo que trabaje en escenarios de caudales y en calidad del agua.</p>	

Cuadro 3.25
Métodos hidrobiológicos y de simulación del hábitat

Fuente: Elaboración propia

Métodos hidrobiológicos y de simulación del hábitat	Características	<p>Premisa: las especies de peces y la biodiversidad acuática, en general, están adaptadas a ciertas características hidráulicas, estructurales y geomorfológicas. Al conocer cómo afecta el caudal a estas características, se puede predecir el caudal óptimo para mantener las poblaciones de estos organismos.</p> <p>Los métodos hidrobiológicos o de simulación del hábitat fueron desarrollados principalmente para peces, pero se aplican también a otros organismos, como invertebrados y vegetación de ribera. Estos métodos combinan el resultado de la simulación hidráulica de profundidad, velocidad y sustrato en las secciones representativas con los criterios de preferencia biológica de los organismos objetivo para generar unas relaciones funcionales entre el caudal (Q) y un índice de hábitat (IH).</p> <p>La incorporación de otras especies indicadoras se puede hacer definiendo, por ejemplo, el parámetro hidráulico a satisfacer como requerimiento ambiental para la simulación hidráulica o para la simulación del hábitat, incorporándole curvas de preferencia. La mayor dificultad en su aplicación radica en la obtención de información biótica con la profundidad adecuada.</p>
	Información y experiencia requerida para la aplicación del método	<p>Datos: curvas de idoneidad del hábitat, información topográfica e hidráulica del área en estudio, caudales de partida (pueden ser definidos a través de un método hidrológico) y datos de calidad del agua.</p> <p>Nivel de experiencia: biólogo especializado en el conocimiento de especies indicadoras y en manejo o elaboración de curvas de idoneidad, especialista en hidráulica (modelación) y especialista en hidrología y calidad del agua.</p> <p>Tipo de trabajo: en gabinete y campo.</p>
	Consideraciones importantes	<p>Los métodos de simulación hidráulica y de simulación del hábitat presentan limitaciones técnicas en función del tipo de modelo hidráulico (1D o 2D) que lo sustente. Respecto a los modelos hidráulicos 1D tradicionales, no es conveniente su implementación en ríos de alta montaña, ríos con altas pendientes y macrorugosidad, ni tampoco en ríos trenzados, en los cuales el flujo presenta una clara componente bidimensional. La implementación de modelos hidráulicos 2D tampoco es conveniente en ríos de montaña, especialmente donde se presenten pendientes fuertes o cambios bruscos de la misma; por ejemplo, en saltos del flujo o cuando la pendiente sea superior al 10 %. Estas y otras limitaciones de los modelos señalados deben ser consultadas específicamente según las ecuaciones utilizadas en el modelo.</p>
	Ajustes por tipo de proyecto	<p>Para proyectos hidroeléctricos, se recomienda solicitar al proyecto (ingeniería o al estudio ambiental), como estudio complementario, un modelo de calidad de agua en el embalse que incluya una inferencia de la calidad del agua turbinada y su área de influencia. En función de la ubicación de la obra de desfogue del caudal ecológico (si es de fondo), se deberán hacer análisis similares para proyectos de riego y de abastecimiento urbano.</p>
Métodos recomendados	<p>Modelo de simulación física de los hábitats <i>(PHABSIM, por sus siglas en inglés)</i> (Modelos similares: RSS, HABIOSIM, RHYHABSIM, EVHA, CASIMIR, PHABWin, y RHABSIM, el paquete informático RHABSIM 3.0 creado por Thomas R. Payne & Associates adaptado al español)</p>	<p>Características: genera un modelo que muestra la relación entre los niveles de caudal y corriente con el hábitat físico de varias especies de peces en diferentes etapas de su vida. El modelo utiliza mediciones reales (profundidad, velocidad y material de base) de transectos a través del río para crear modelos hidráulicos. Estos se combinan con criterios de idoneidad de las especies para producir un índice que muestra la cantidad de hábitat que es capaz de aprovechar un pez en las diferentes fases de su desarrollo.</p> <p>Datos: curvas de idoneidad del hábitat, información topográfica e hidráulica del área en estudio, caudales de partida (pueden ser definidos a través de un método hidrológico) y datos de calidad del agua.</p> <p>Consideraciones importantes: requiere de trabajos de campo complementarios a los realizados en la etapa de diagnóstico en el área biótica y la realización de un análisis adicional en el escenario con proyecto.</p> <p>Descarga PHABSIM https://www.usgs.gov/software/physical-habitat-simulation-phabsim-software-windows</p>



Etapa IV. Descripción de los grupos de metodologías de cálculo de caudales ecológicos

Introducción

La etapa IV del procedimiento contempla los aspectos más importantes para la aplicación de las diferentes metodologías para el cálculo de caudales ecológicos, relacionados principalmente con la información requerida y aspectos que permitirán establecer un régimen adecuado de caudales. Los grupos de métodos considerados son los hidrológicos, hidráulicos e hidrobiológicos o de simulación del hábitat.

Dependiendo de la complejidad del método, se debe evaluar si la información generada en la etapa II es suficiente o si se requieren complementaciones: i) respecto al tramo en estudio, ratificándolo o redefiniéndolo e incorporando, si es pertinente, la necesidad de secciones representativas ampliadas del cauce (tramos de rápidos, pozas, descanso, etc.) y tramos con continuidad topográfica, entre otros; ii) respecto a la información hidrológica; y, fundamentalmente, iii) respecto a las necesidades ambientales de las especies indicadoras seleccionadas en las diferentes etapas de su vida (alevines, juveniles y adultos, si se trata de peces). Todo requerimiento de información adicional debe ser coordinado con las diferentes disciplinas, de forma que los puntos de control sean los mismos.

Es importante considerar, respecto al régimen de caudales ecológicos en los grupos de metodologías hidráulicas, hidrobiológicas y de simulación del hábitat, que es necesario aplicar inicialmente alguna metodología hidrológica que proporcione caudales ecológicos mensuales de partida, los cuáles serán ajustados según los criterios de las metodologías específicas.

Se reitera que la Guía no pretende establecer una metodología específica a aplicar, sino un grupo de métodos recomendados. La decisión del método específico a emplear corresponde a los especialistas (hidrólogo y biólogo) que encaran el estudio de los caudales ecológicos, considerando las numerosas variables que se presentan en cada aprovechamiento de los recursos hídricos y que no es posible generalizar. En la descripción que se realiza en los siguientes acápite, se mencionan, solo como referencia, algunas particularidades de métodos relacionados con el tipo de información que demandan y sus resultados.

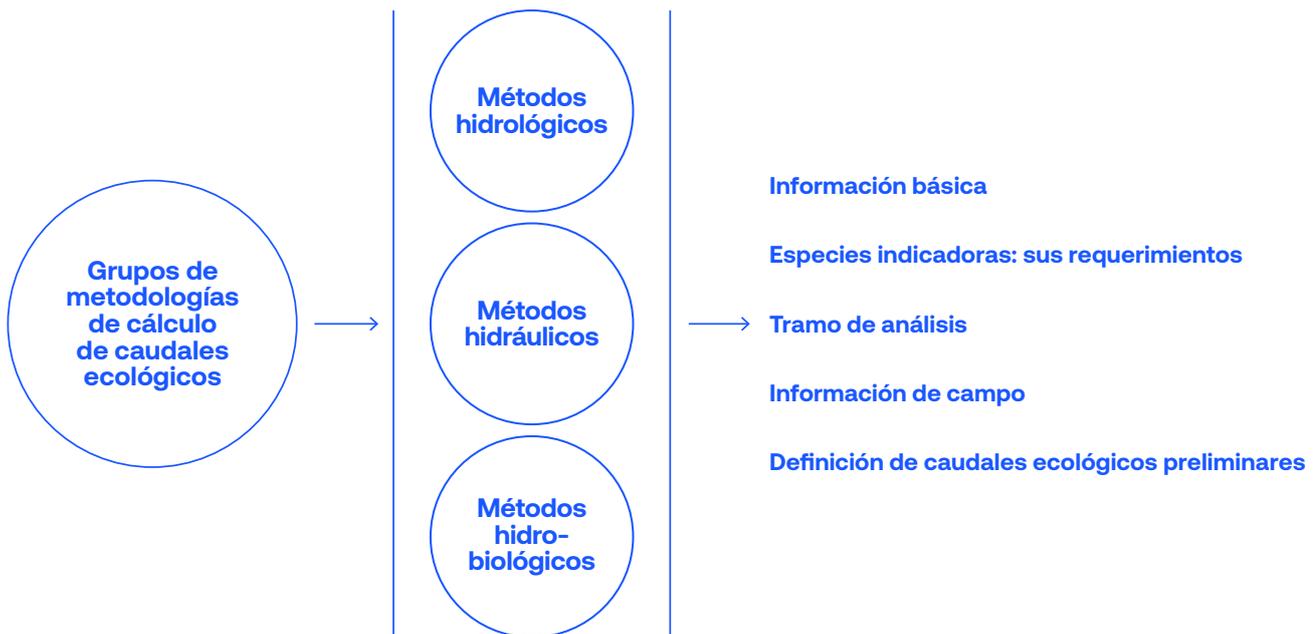
Métodos hidrológicos

Consideraciones generales

Los métodos hidrológicos se han desarrollado como índices a partir de la curva de permanencia de caudales y la información del régimen natural. Su requerimiento de información se circunscribe a datos de caudales diarios o mensuales, según el método, información generada en la

Figura 3.18
Actividades de la etapa IV del procedimiento

Fuente: Elaboración propia



etapa II. No requieren para su aplicación información del tramo en estudio ni requerimientos ecológicos debido a que su importancia se definió como no trascendente y, por tanto, tampoco necesita datos de campo complementarios. Sin embargo, algunos métodos hidrológicos, en su concepción, toman en cuenta los requerimientos mínimos de la biota.

Determinación de caudales ecológicos

Los caudales ecológicos se determinan considerando la variabilidad natural de los caudales. En el **método del 10 % del caudal medio**, bastará con establecer los caudales medios a partir de una base de datos igual o mayor a 20 años, que además cumpla con criterios de consistencia y homogeneidad, cuando la disponibilidad de información lo haga posible.

El método del Q95 emplea datos de caudales para establecer la curva de permanencia a nivel mensual; es decir, que se generan curvas de duración de caudales para cada mes del año y, a partir de ella, se establece el caudal de permanencia del 95 % del tiempo. De esta forma, se tendrá una distribución de caudales que marcará un régimen natural.

El método de Tennant utiliza para su aplicación datos diarios de caudales, aunque también pueden aplicarse caudales mensuales en caso de no estar disponibles los diarios. El método, pese a ser hidrológico, incorpora criterios ecohidrológicos desarrollados a partir de datos hidrológicos e información íctica de especies comerciales y deportivas del Norte de los Estados Unidos. Como resultado se estableció que:

- El 60 % del caudal medio provee condiciones óptimas para la vida acuática durante sus periodos iniciales de crecimiento y para la mayoría de actividades de recreación.
- El 30 % del caudal medio es recomendado como caudal base para mantener condiciones aceptables para la vida acuática y para la recreación.
- El 10 % del caudal medio es el mínimo caudal instantáneo recomendado para mantener a corto plazo los hábitats para la mayoría de especies acuáticas.

A partir de lo indicado, Tennant generó regímenes de caudales a ser considerados en la determinación de caudales ecológicos. Nótese que los regímenes de caudales deberán ser modificados de acuerdo con el hemisferio donde se apliquen. En el cuadro 3.26, los valores corresponden al hemisferio Norte y deberán ser modificados de acuerdo con los periodos de estiaje y húmedos de cada país.

Cuadro 3.26 Regímenes de caudales para peces, vida acuática, recreación y otros recursos ambientales relacionados

Fuente: Tennant (1976)

Criterio descriptivo de caudales	Regímenes de caudal base recomendados	
	octubre-marzo	abril-septiembre
Crecida o máximo	200 % del caudal promedio	
Rango óptimo	60-100 % del caudal promedio	
Sobresaliente	40 %	60 %
Excelente	30 %	50 %
Aceptable	20 %	40 %
Básico o degradado	10 %	30 %
Pobre o mínimo	10 %	10 %
Degradado	10 % del promedio o menos	

El método del índice 7Q10 se desarrolla a partir de caudales medios mínimos diarios. Sin embargo, tomando en cuenta la dificultad de obtener este tipo de información, se suelen emplear datos de caudales medios diarios. Se considera la totalidad del registro diario disponible, cuya homogeneidad y consistencia está verificada, y se aplica un promedio móvil para un periodo de 7 días a fin de estimar el caudal promedio semanal; posteriormente, se construye la serie anual de excedencias con los registros semanales de cada año; luego, se realiza el análisis de frecuencias de eventos mínimos extremos para la serie anual construida a fin de conocer la distribución de probabilidad que mejor se ajuste, y se selecciona el caudal correspondiente al periodo de retorno de 10 años, que resulta ser el 7Q10.

Métodos hidráulicos

Consideraciones generales

Los métodos hidráulicos permiten determinar caudales ecológicos en base a la relación existente entre los caudales y los parámetros hidráulicos del cauce (profundidad, velocidad, ancho, perímetro mojado) relacionados con una especie indicadora.

En los métodos hidráulicos, el caudal mínimo óptimo es aquel que se identifica en un punto de quiebre en la curva generada entre el parámetro hidráulico relevante y el caudal, punto que garantizaría un valor umbral del parámetro hidráulico seleccionado que mantendría la integridad de la biota o del ecosistema, en particular la producción primaria y secundaria. Será necesario elegir el parámetro hidráulico que mejor represente a la comunidad del organismo seleccionado como indicador en función del caudal. También es posible determinar los caudales ecológicos considerando que los parámetros hidráulicos con una serie de caudales deben satisfacer las necesidades de las especies indicadoras.

Información básica

Se requiere información sobre los siguientes aspectos:

- **Especies indicadoras.** Las especies indicadoras fueron definidas en la etapa II. Es preciso conocer cuáles son sus necesidades para cumplir de forma satisfactoria su ciclo de vida; por tanto, es necesario contar con las curvas de idoneidad de las especies, que proporcionen información sobre sus requerimientos de profundidad, velocidad y perímetro mojado.

En los métodos hidráulicos se puede recurrir a información existente y a paneles de expertos para establecer características de las especies indicadoras.

Sobre los métodos a aplicar, se recomienda el del perímetro mojado cuando las especies indicadoras son macroinvertebrados, ya que el método considera el análisis de una o dos secciones representativas. Si las especies indicadoras son peces, se deberá aplicar el método hidráulico de múltiples transeptos, que permite el análisis de varias secciones o tramos completos de río.

- **Caudales.** Es preciso conocer: i) los aforos en, por lo menos, dos épocas del año características; ii) caudales del análisis hidrológico (deseable su aplicación con fines comparativos).

Los métodos hidráulicos consideran los caudales obtenidos a través de aforos. Sin embargo, para establecer caudales ecológicos mensuales, se recomienda emplear previamente caudales de inicio determinados con cualquier método hidrológico, siendo recomendables el de la curva de duración de caudales Q90-Q95 o el método del índice 7Q10, los cuales proveerán una distribución mensual.

- **Tramo en análisis:** secciones transversales del río (topografía o topobatimetría). El tramo en análisis básico se constituye de forma inicial en el área en estudio definida en la etapa II y sufre modificaciones en función de los requerimientos de la especie indicadora o de acuerdo al punto donde se estableció que las alteraciones al caudal se restituyen o ya presentan las condiciones para sustentar las necesidades de la biodiversidad.

El método seleccionado estará en función de la importancia de las especies. Si se emplea el método del perímetro mojado, se tratará de macroinvertebrados o especies ícticas con bajos requerimientos hidráulicos de movilidad y descanso; por tanto, el tramo en estudio será reducido y se podrá limitar a una o dos secciones representativas. Por el contrario, si el requerimiento de la especie indicadora es más exigente, se empleará el método de los múltiples transeptos, caso en el cual el tramo en análisis deberá cubrir zonas de refugio, de descanso y movilidad con secciones variables, y, posiblemente, incluir secciones hasta encontrar el aporte de un afluente que contribuya a mitigar las alteraciones generadas por el embalse.

Una vez definido el tramo, se establecen las secciones representativas de forma coordinada con el especialista en biología e hidráulica. Cuando las especies indicadoras correspondan a macroinvertebrados, es importante buscar secciones con aguas de tipo rápido, debido a que alteraciones en ese régimen suelen tener efectos negativos en esas especies. En el caso de que las especies indicadoras consideren peces, es imprescindible seleccionar secciones que incluyan sus costumbres y aquellas que puedan ser más sensibles a los cambios en el régimen de caudales y que, a su vez, ocasionen alteraciones a los parámetros hidráulicos principales: secciones con pozas, secciones ensanchadas y encajonadas, y zonas que muestren su función de conectividad entre ambas.

- **Datos de campo.** La información de campo incluye puntos anteriores. En el caso del método del mismo nombre, se incorporan campañas hidrométricas con el objeto de construir la curva que relaciona al caudal con el perímetro mojado y, en el caso de múltiples transeptos, se pueden incluir otros parámetros, tales como la profundidad y velocidad del flujo.

En el caso del **método del perímetro mojado**, se suelen realizar varias campañas para lograr construir la curva de caudal con relación al perímetro mojado. Sin embargo, después de tres campañas de aforo de forma óptima (época seca, de transición y húmeda) o dos campañas como mínimo (época seca y época húmeda), y si se cuenta con un perfil topobatimétrico adecuado, se puede proceder a calcular el perímetro mojado aplicando la ecuación de Manning, asumiendo una rugosidad adecuada del lecho. La información de campo deberá ser sistematizada en fichas que incluyan los siguientes datos: las secciones de estudio georreferenciadas y documentadas fotográficamente (sección y entorno), los caudales aforados y otros parámetros medidos.

Para la aplicación del **método de los múltiples transeptos**, se establecen secciones representativas y en ellas se realizan una topobatimetría y mediciones de profundidades de flujo, velocidades y caudales. Es posible enlazar la topobatimetría específica realizada en secciones críticas con el levantamiento topobatimétrico o topográfico realizado como parte de la ingeniería del proyecto (los caudales ecológicos son componentes del proyecto) a fin de contar con información continua del tramo en estudio. Con la información señalada, se podrán realizar simulaciones hidráulicas (p. ej., modelo HEC-RAS) empleando rugosidades calibradas en campo y, adicionalmente a los caudales aforados, caudales de inicio que pueden ser determinados con el método hidrológico. La información de campo deberá ser sistematizada en fichas que incluyan los siguientes datos: las secciones de estudio georreferenciadas y documentadas fotográficamente (sección y entorno), los caudales aforados, la velocidad y las profundidades del flujo, la descripción del sustrato y la descripción de las secciones en cuanto a su morfología.

Lo expuesto muestra, para ambas metodologías, que es posible completar el trabajo de campo con modelos matemáticos o expresiones teóricas de la hidráulica contando con información básica: caudales (medidos y otros establecidos a través del estudio hidrológico), rugosidades (calibradas en campo) y topobatimetría (secciones y perfil longitudinal del río).

Los **métodos hidráulicos complejos** requieren una topografía o topobatimetría más continua que los métodos de múltiples transeptos. Generalmente se necesitan por lo menos 20 secciones representativas, que muestren la morfología del cauce con sus diferentes variaciones. No obstante, dependiendo de las características del curso, se podrán emplear más o menos secciones. Se reitera que las secciones deben mostrar sitios críticos que representen las necesidades de las especies indicadoras en sus diferentes ciclos de vida, considerando de forma particular secciones intermedias que permitan la conectividad. Será necesaria la elaboración de fichas con información relevada en puntos

críticos (coordenadas, características del sustrato, entorno), acompañada de descripciones generales si se trata de topografía o topobatimetría de todo el tramo.

Determinación de caudales ecológicos

De forma genérica, la determinación de caudales ecológicos con los métodos hidráulicos consiste en el establecimiento del comportamiento de ciertos parámetros hidráulicos en relación a las necesidades de las especies indicadoras.

En el caso del **método del perímetro mojado**, para la determinación de los caudales ecológicos se debe realizar una gráfica de caudales con relación al perímetro mojado (a través de un modelo como HEC-Ras, ver figura 3.19) e identificar el punto de quiebre en la curva, punto que mostrará el caudal mínimo necesario para que la comunidad acuática no sea afectada (véase figura 3.19).

Figura 3.19
Simulación de un curso con el modelo HEC-Ras, donde se muestra la sección y el gráfico del perímetro mojado con el punto de inflexión

Fuente: Elaboración propia

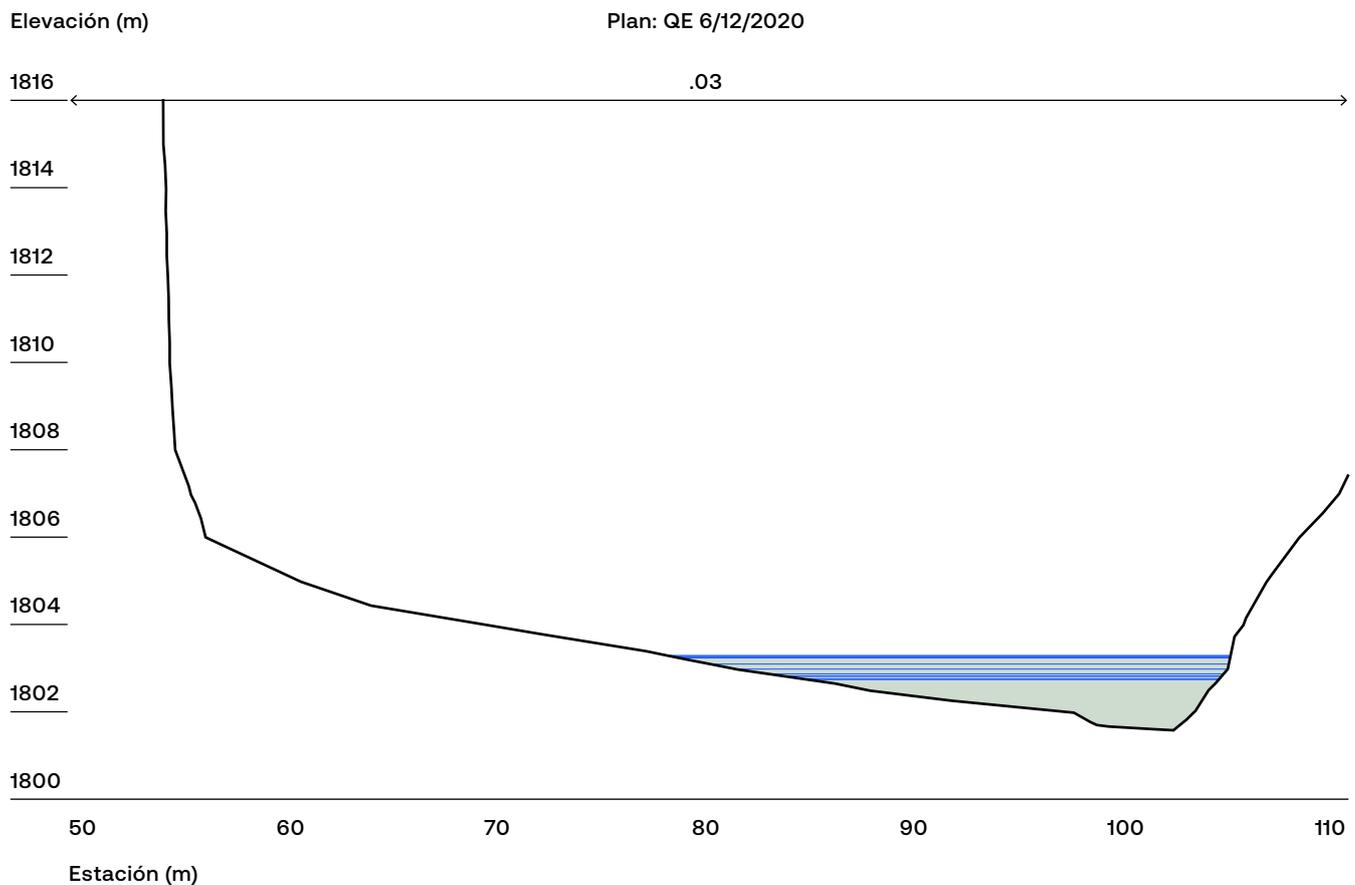


Figura 3.20
Curva que relaciona el perímetro mojado con el caudal en una sección de un río

Fuente: Guía Metodológica para determinar el Caudal Ambiental para Centrales Hidroeléctricas en el SEIA, Editor: Servicio de Evaluación Ambiental, Chile 2016

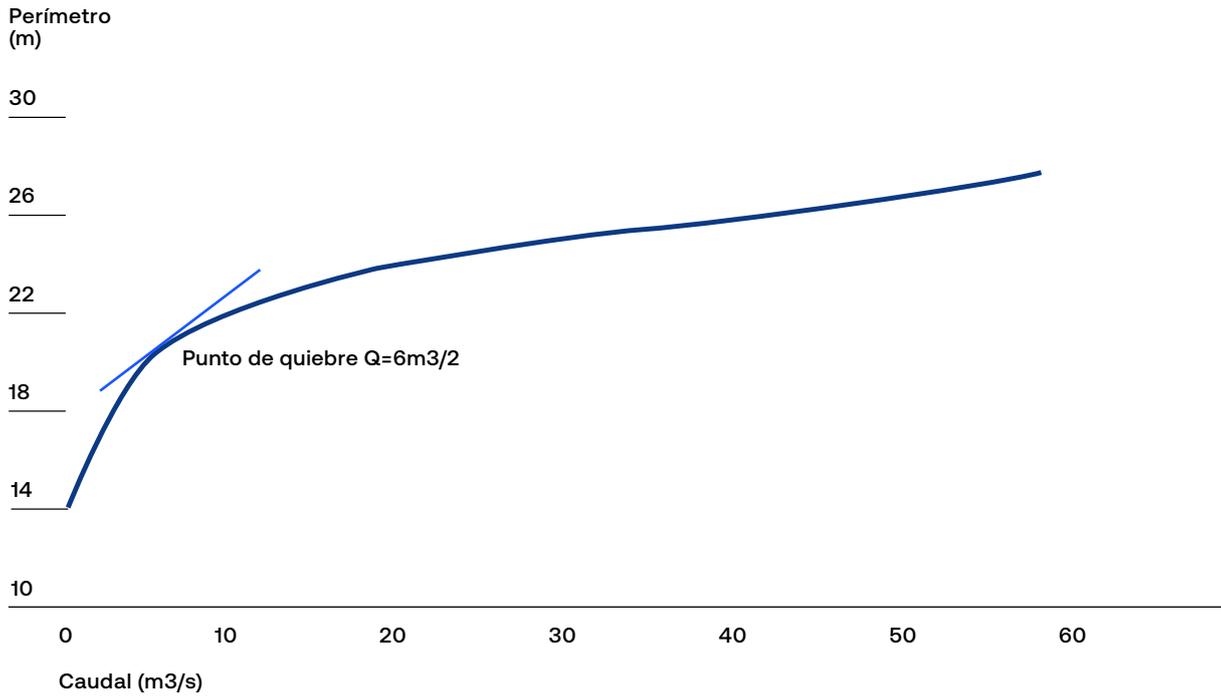
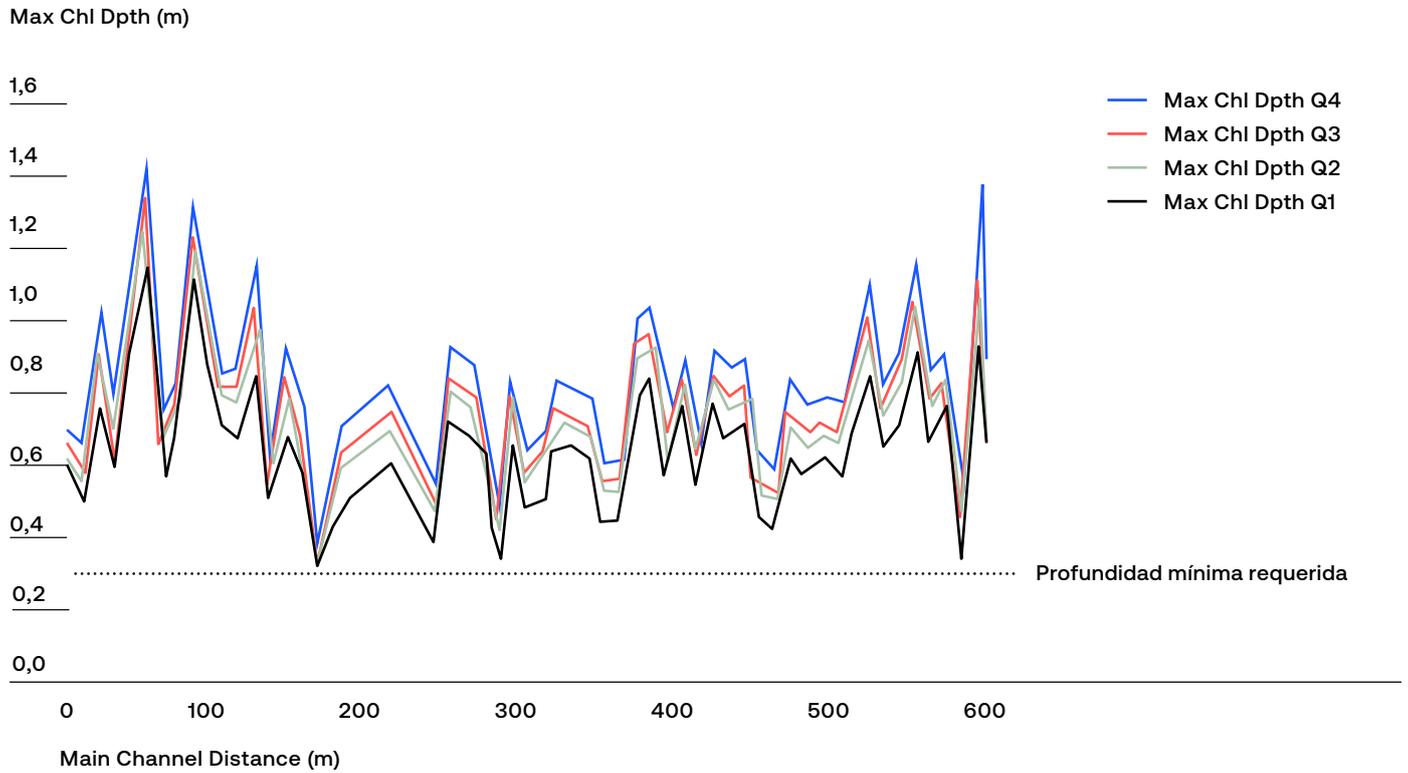


Figura 3.21
Perfil longitudinal de un río con diferentes niveles de agua, respecto a la profundidad mínima requerida por la biota

Fuente: Elaboración propia



El **método de múltiples transeptos** sigue criterios similares a los del perímetro mojado (figura 3.19), ampliado a más secciones en estudio (figura 3.20), debiéndose verificar que los caudales definidos cumplan lo determinado en todas las secciones analizadas.

En ambas metodologías, se deberá considerar la variabilidad de los caudales a nivel mensual. Como se mencionó anteriormente, se deberían considerar, como base, tres aforos como mínimo (en época seca, de transición y húmeda) o en situación alternativa dos aforos (en época seca y húmeda), los cuales proporcionarían un régimen estacional. Sin embargo, tomando como referencia las mediciones de campo, se podrían establecer caudales mensuales diferenciados, incluyendo en el análisis un escenario con caudales definidos por algún método hidrológico que permita realizar una comparación y, si es válida, establecer un régimen mensual. Lo importante es llegar a establecer un régimen de caudales.

En los **métodos hidráulicos de simulación compleja o hidrobiológicos simplificados**, se determinan caudales ecológicos en función de los requerimientos de profundidad, velocidad y sustrato de las especies indicadoras. En consecuencia, se debe verificar que se cumplan las condiciones de establecimiento y desarrollo de las especies indicadoras en todo el tramo analizado.

La simulación hidráulica se realiza con modelos matemáticos (p. ej., HEC-RAS), ya sea en una o dos dimensiones. La última opción es recomendable en cursos donde se generan áreas de inundación (cursos de llanura o cursos con baja pendiente), que requieren ser simuladas y donde, evidentemente, el flujo será bidimensional. En caso contrario, se podrá realizar la simulación unidimensional. En ambos casos, se deberán seguir los procedimientos propios de la modelación hidráulica relacionados con el régimen de flujo y la calibración de parámetros. Para la modelación, se emplearán caudales aforados y se podrán utilizar caudales de inicio generados a través de un método hidrológico. Las rugosidades se definirán diferenciando cauce y márgenes, considerando variaciones por tramos; la topografía o topobatimetría será detallada, cumpliendo las especificaciones de la ingeniería del proyecto.

Los caudales ecológicos deberán cumplir el requerimiento hidráulico de las especies indicadoras en todos los tramos analizados, en los cuales deberá garantizarse adicionalmente que exista conectividad. Los caudales ecológicos deberán conservar un régimen mensual³.

Métodos de simulación del hábitat

Consideraciones generales

Los métodos de simulación del hábitat físico se basan en métodos hidráulicos, con la diferencia de que los requerimientos de caudal consideran los requisitos biológicos específicos, son mucho más completos, principalmente, cuando se requiere utilizar a peces como especie indicadora. Estos modelos consideran que por lo menos cinco componentes principales del ecosistema fluvial condicionan su productividad biológica: el régimen de caudal, la estructura del hábitat físico, la calidad físico-química del agua, la entrada de energía y las interacciones bióticas, la compleja relación entre estos componentes determina la productividad primaria y secundaria, y, por tanto, el estado ecológico.

Estos métodos consisten en la simulación del hábitat físico de especies acuáticas conectando modelos hidráulicos con curvas de idoneidad de cada especie objetivo, obteniendo una cuantificación del hábitat disponible en el tramo de estudio.

Las curvas de idoneidad, antiguamente consideradas como curvas de preferencia, buscan generar un índice que cuantifica la idoneidad del hábitat con respecto a una variable en particular. En un principio fueron implementadas en peces, pero posteriormente se fue extendiendo a macroinvertebrados, moluscos y especies no acuáticas, que dependen de cursos de agua para su subsistencia.

Información básica

Se requiere información sobre los siguientes aspectos:

- Especies indicadoras y curvas de idoneidad. En la etapa II del procedimiento, se definieron especies indicadoras que deben ser verificadas en la presente etapa debido a que los métodos de simulación del hábitat requieren bastante detalle en la información; por tanto, es imprescindible contar con curvas de idoneidad. Las funciones de idoneidad más usadas son curvas que se agrupan en cuatro categorías descritas por Martínez Copel (s.f.):
 - Las de categoría I (Bovee, 1986) se basan en la opinión de expertos, llegándose a un consenso final por distintos métodos, por ejemplo, la técnica Delphi.
 - Las de categoría II, [son] curvas de uso o utilización, obtenidas por medición en los puntos ocupados por los organismos (p. ej., peces en actividad de alimentación). El muestreo de campo debe cubrir una proporción igual de los distintos tipos de microhábitats disponibles en el río estudiado (de forma práctica,

³ Es necesario que una vez definidos los caudales ecológicos con métodos hidráulicos, se realice un análisis de la calidad del agua que se requeriría para que se cumpla el concepto de caudales ecológicos.

rápido-somero, rápido-profundo, lento-profundo y lento-somero), aplicando el método de igual esfuerzo (Johnson, 1980). Al aplicar este método se reduce el error debido a los efectos de la disponibilidad del hábitat sobre la selección del hábitat; este error también se reduce considerando varios tramos distintos del mismo río y con tamaños muestrales elevados. En general se considera que con 150-200 datos puede obtenerse una curva (para una especie, talla, actividad) relativamente estable al tamaño muestral, así pues, se recomienda subir más de 200 datos independientes. Actualmente, el método de igual esfuerzo es el más recomendado para el desarrollo de funciones de idoneidad de microhábitat y el que resulta aplicable en ríos ibéricos. Además de tomar datos donde se localizan los organismos, deben tomarse datos aleatorios donde estos no están para comprobar estadísticamente que realizan un uso selectivo del microhábitat, de igual modo si son de categoría III (Groszens y Orth, 1993).

— Las de categoría III, [han sido] desarrolladas a partir de los llamados índices de selección (originarios de estudios de alimentación). Se basan en el concepto de preferencia de Manly et al. (1993), que es el uso de un recurso (un tipo de microhábitat concreto) en una proporción superior a aquella en la que este se encuentra disponible en el medio. Frecuentemente fueron llamadas curvas de preferencia; actualmente este nombre está mal considerado por numerosos especialistas en el tema. Su uso genera distintos problemas, dependiendo del tamaño de intervalo utilizado y del tamaño muestral, que debe ser elevado; por ello su uso se ha desaconsejado, siendo más aceptado el uso de curvas de categoría II por el método de igual esfuerzo (Bovee et al., 1998). Hoy día, una relevante proporción de las curvas disponibles y utilizadas en distintos países pertenecen a este tipo y son válidas.

— Las de categoría IV, engloban las curvas condicionadas (Bovee et al., 1998), modelos de presencia/ausencia obtenidos por regresión no lineal, y otras funciones multivariantes (ver Ahmadi-Nedushan et al., 2006). Las curvas condicionadas son muy útiles para reflejar interacciones biológicas en el medio acuático, por ejemplo, entre el uso de la profundidad y el refugio. Para ciertos peces la idoneidad de las zonas someras es baja cuando no hay un refugio de vegetación colgante, o un agua con cierta turbidez; sin embargo, en otras condiciones la selección de zonas someras aumenta (pp. 6-7).

- Caudales. Es preciso conocer: i) aforos por lo menos en dos épocas del año características; ii) caudales históricos (régimen de caudales naturales), y iii) caudales del análisis hidrológico (deseable su aplicación con fines comparativos).

Los métodos hidrobiológicos y de simulación del hábitat consideran los caudales obtenidos a través de aforos. Sin embargo, para establecer caudales ecológicos mensuales, es necesario emplear previamente caudales de inicio determinados con cualquier método hidrológico; por ejemplo, el método de la curva de duración de caudales Q90-Q95 o el método del índice 7Q10. Estos caudales serán ajustados de acuerdo con los resultados obtenidos con las diferentes metodologías a aplicar.

- Tramo en análisis: secciones del río (topografía, topobatimetría). El área en estudio definida en la etapa II del procedimiento se debe considerar como base y, sobre ella, analizar si se necesita una ampliación teniendo en cuenta las necesidades de las especies indicadoras o la distancia en la cual el río puede sustentar el ecosistema con el aporte de algún curso tributario o el punto donde se restituyen los caudales a regímenes naturales o mínimos para sustentarlo.

Las secciones a considerar dentro del tramo deberán representar las variaciones morfológicas del curso que pudieran incidir en las especies indicadoras. Nótese que, en el caso de modelos de simulación del hábitat, puede requerirse incluso áreas mayores que consideren diferentes tipos de especies indicadoras e incluyan no solo peces, sino otras especies que dependan del agua para su desarrollo.

- Parámetros de calidad del agua. La información de calidad del agua en la situación sin proyecto corresponde a la generada en la etapa II. No obstante, en esta fase, se debe realizar una inferencia de la situación con embalse e incluso se debería tomar en cuenta la fase de llenado.
- Datos de campo. La información de campo incluye puntos anteriores. La información topobatimétrica del cauce se realiza en un número variable de secciones: entre 6 y 10 si dicho cauce es simple (con alteraciones en planta poco significativas) y entre 18 y 20 si el curso es complejo (trenzado o si presenta meandros con variación de sección importante) (Payne et al., 2004). Las secciones deben ser representativas de la morfología del cauce, mostrando características de sectores de flujo rápido, lento, transiciones, etc. Complementariamente, es necesario densificar la topografía o topobatimetría al tramo en estudio a fin de dar continuidad a la misma y poder representar el perfil del cauce.

En las secciones seleccionadas (no en las complementarias), se deben realizar los aforos y mediciones de profundidad y velocidad ya que estos modelos distribuyen la velocidad media simulada en la sección transversal a cada celda mediante los factores de distribución de velocidades. Asimismo, se deberá considerar la necesidad de elaborar curvas de descarga para la calibración de los modelos hidráulicos, razón por la cual se debe coordinar previamente el trabajo de campo con las áreas de biología e hidráulica que liderarán la simulación del hábitat.

Los aforos se deben realizar en época seca y húmeda como mínimo, aunque es deseable efectuarlos también en periodos de transición si el especialista en biología así lo recomendará.

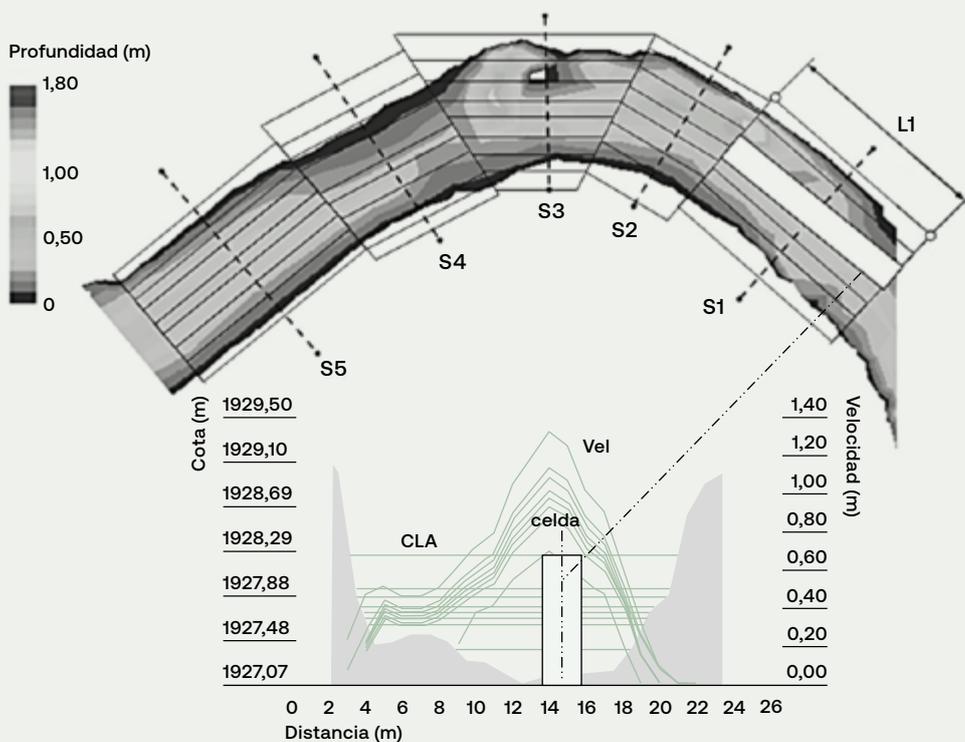
El trabajo de campo incluye la obtención de información complementaria a definir por el biólogo, pudiendo ser necesario realizar tomas de muestras de agua para completar la caracterización obtenida en la etapa II y realizar nuevas capturas de las especies indicadoras, a fin de contar con datos de tallas, peso, abundancia y hábitos alimentarios en los diferentes estadios de desarrollo, que, ligados a los parámetros hidráulicos, incluido el sustrato, permitan elaborar curvas de preferencia si estas no se encontraran disponibles. Es importante recalcar que modelos como el PHABSIM están enfocados a la determinación de las preferencias de la especie en cuanto a velocidad media, profundidad de flujo y sustrato o índice de canal.

Determinación de caudales ecológicos

El modelo de simulación del hábitat más conocido es el PHABSIM (Physical Habitat Simulation), que se constituye en un módulo del IFIM (Instream Flow Incremental Methodology). La evaluación espacial del hábitat PHABSIM combina el resultado de la simulación hidráulica de profundidad, velocidad y sustrato en las secciones representativas con los criterios de preferencia biológica de los organismos objetivo, para generar unas relaciones funcionales entre el caudal (Q) y el índice de hábitat (IH). Por tanto, se desarrollan en tres módulos: simulación hidráulica, simulación del hábitat y las relaciones hábitat-caudal, ilustrados en los recuadros 3.1, 3.2 y 3.3 respectivamente. Además, consideran de forma separada la calidad del agua (temperatura y otros parámetros).

Recuadro 3.1 Simulación hidráulica

La simulación hidráulica tiene por objeto caracterizar el flujo en cuanto a velocidad, profundidad y sustrato, para un rango definido de caudales, que, inicialmente, pueden ser resultado de aforos y, posteriormente, los caudales obtenidos a través de métodos hidrológicos, de forma que se puede predecir el comportamiento del cauce en diferentes escenarios. El análisis hidráulico se realiza considerando flujos en 1D, 1D-pseudo y 2D, tipo permanente y variado, en un tramo representado por secciones, que el modelo analiza a partir de celdas. La definición de la dimensionalidad a emplear está en función del tipo de cauce y de si su flujo es predominantemente unidimensional o bidimensional.



Fuente: UVA-Universidad de Valladolid (2017)

Recuadro 3.2 Simulación del hábitat

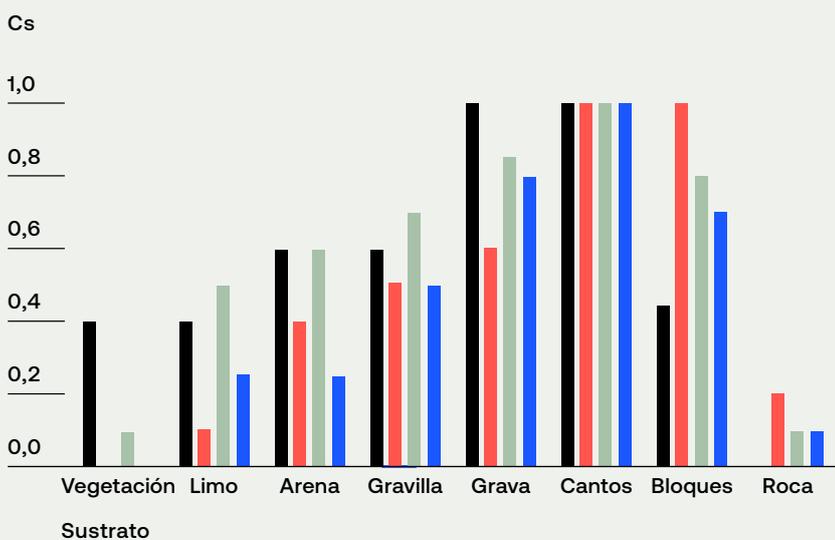
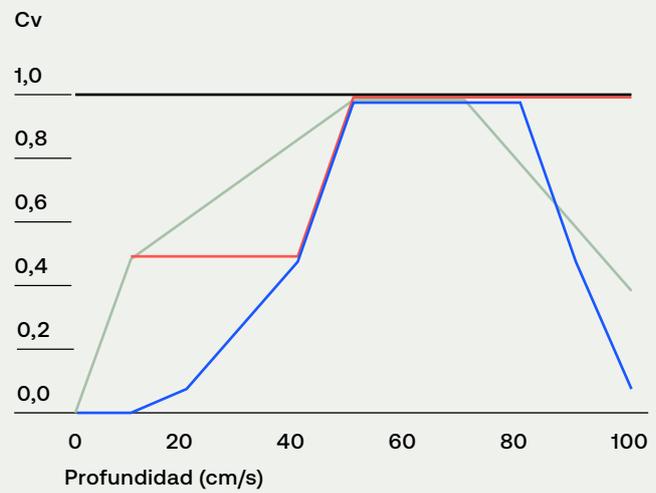
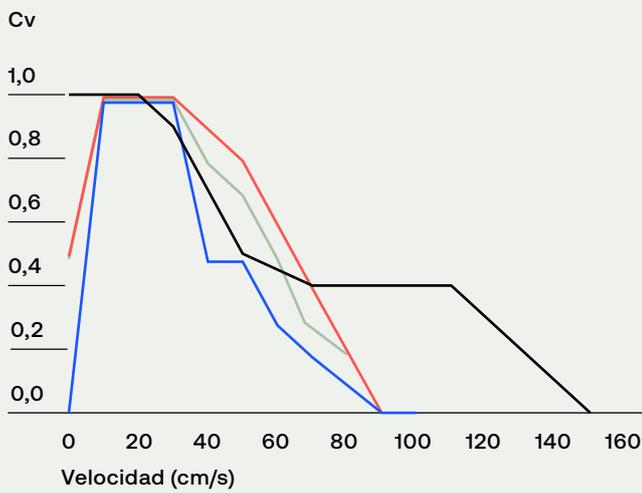
Para la simulación del hábitat se precisa discernir claramente y con detalle la cantidad e idoneidad del hábitat físico disponible para las especies indicadoras, lo cual engloba aspectos hidrológicos, hidráulicos y biológicos. Cualquier cambio en el hábitat físico relacionado con el caudal se refleja en las variables hidráulicas: profundidad, velocidad y sustrato específico de cada sección. El modelo del hábitat pondera cada celda en la que es dividida la sección transversal, utilizando índices que asignan un valor comprendido entre 0 y 1 para cada uno de los parámetros del hábitat considerados (profundidad, velocidad, sustrato e incluso cobertura), indicando cuán adecuados son para la especie considerada.

Curvas de preferencia de macroinvertebrados benthicos para las variables profundidad, velocidad, y sustrato.

Las de los EPT (efemerópteros, plecópteros y tricópteros) fueron desarrolladas por Gore et al. (2001) a partir de unas 1200 muestras y las de los coleópteros por Jowett et al. (1991) con más de 300 muestras.

Fuente: UVA-Universidad de Valladolid (2017)

Macroinvertebrados bentónicos



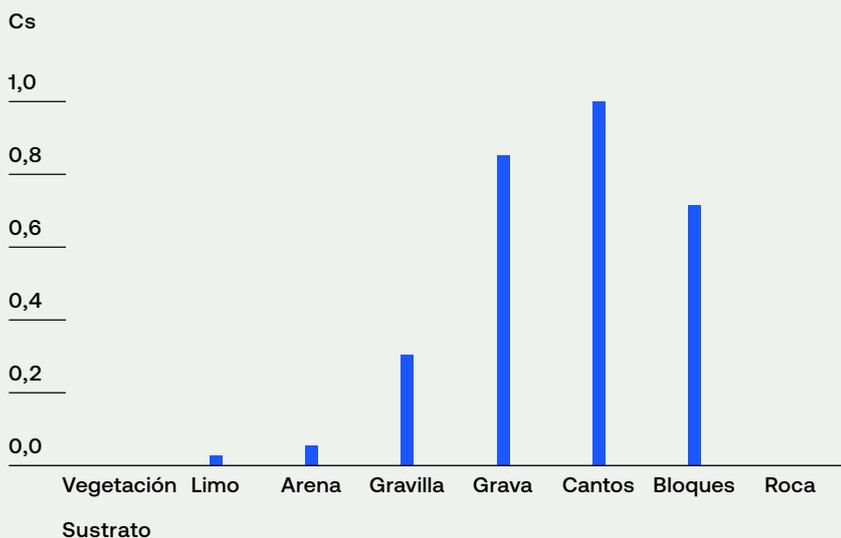
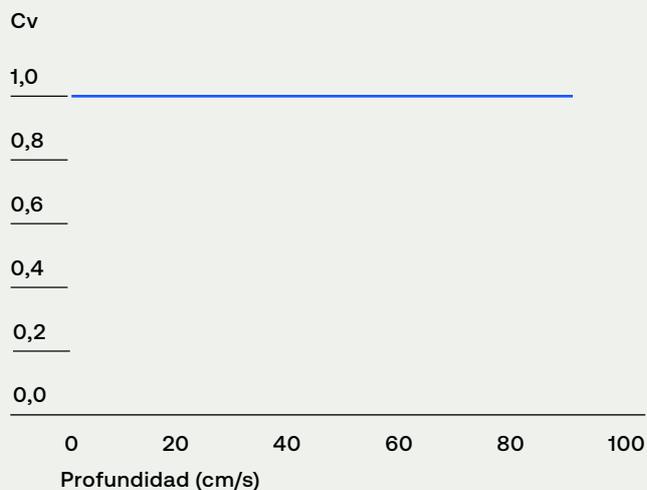
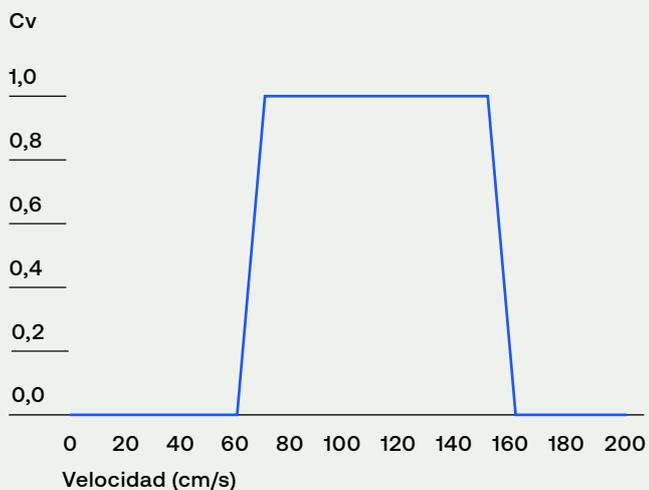
Código	Sustrato	Diámetro medio (mm)
1	Vegetación	-
2	Finos (limo)	<0,06
3	Arena	0,06-2
4	Grafilia	2-8
5	Grava	8-64
6	Cantos	64-264
7	Bloques	>264
8	Roca	-

- Coleoptera
- Trichoptera
- Ephemeroptera
- Plecoptera

Curvas de preferencia para perifiton: diatomeas (Jowett et al., 1991)

Fuente: UVA-Universidad de Valladolid (2017)

Perifiton-Diatomeas



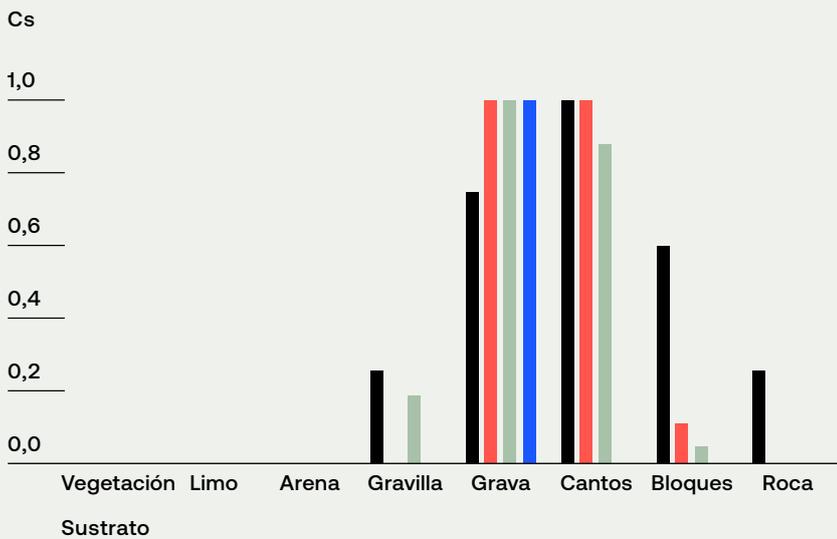
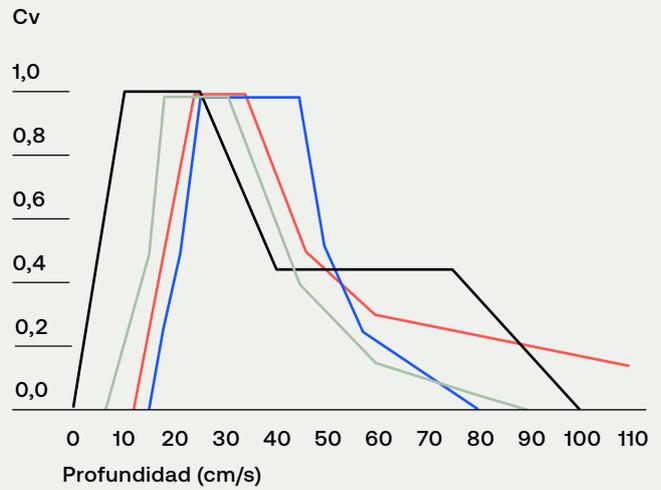
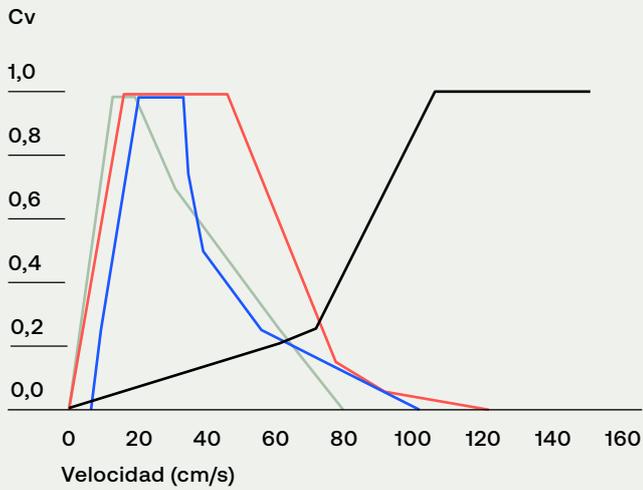
Código	Sustrato	Diámetro medio (mm)
1	Vegetación	-
2	Finos (limo)	<0,06
3	Arena	0,06-2
4	Grafilia	2-8
5	Grava	8-64
6	Cantos	64-264
7	Bloques	>264
8	Roca	-

Curvas de idoneidad de hábitat para la trucha arcoíris (*Onchorrhynchus mykiss*).

Las de los estadios adulto, juvenil, y alevín son las primeras de Bovee (1978). Las de la freza (desove), son las de Shirvell y Dungey (1983).

Fuente: UVA-Universidad de Valladolid (2017)

Trucha arco iris (*Onchorrhynchus mykiss*)

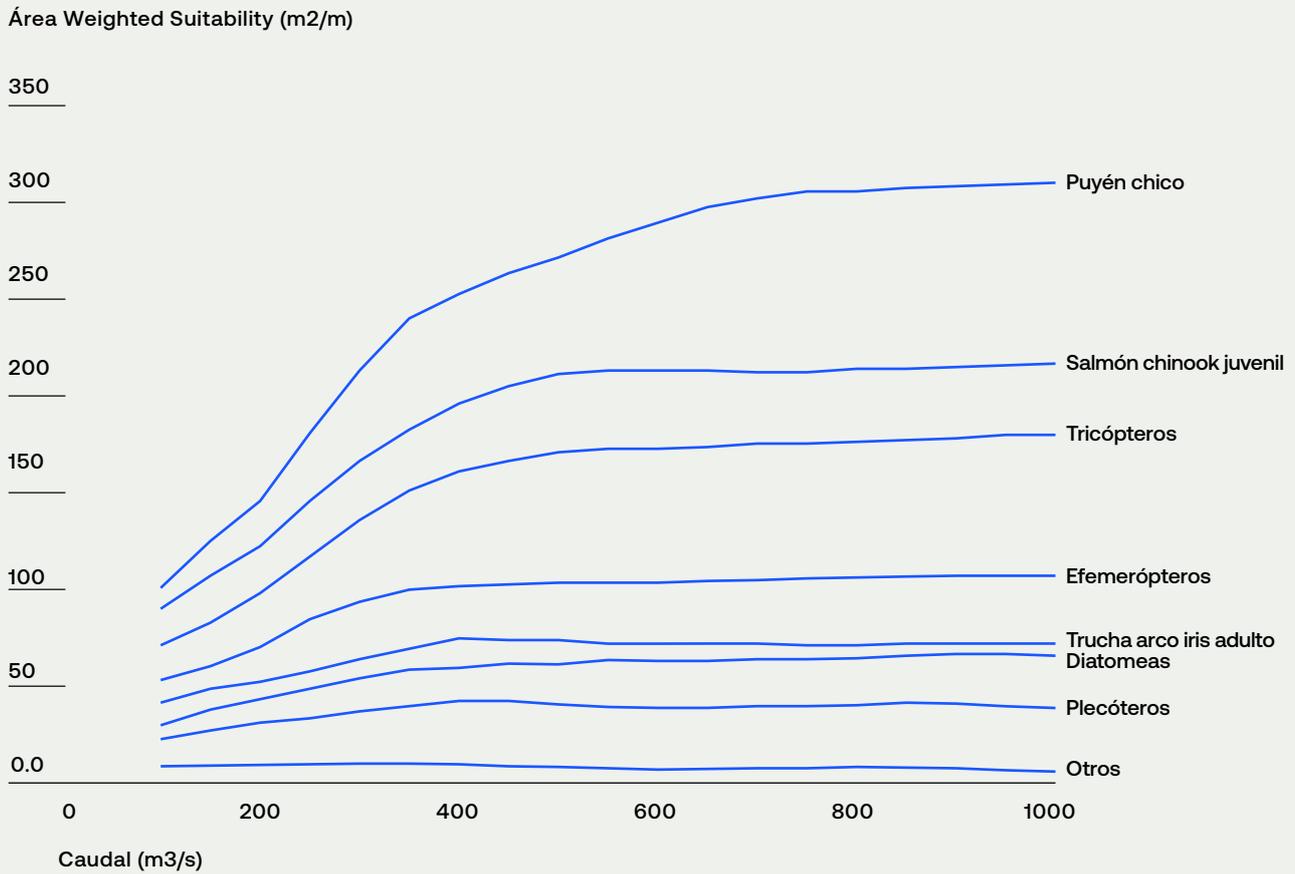


Código	Sustrato	Diámetro medio (mm)
1	Vegetación	-
2	Finos (limo)	<0,06
3	Arena	0,06-2
4	Grafilla	2-8
5	Grava	8-64
6	Cantos	64-264
7	Bloques	>264
8	Roca	-

- Adulto
- Juvenil
- Alevín
- Desove

Recuadro 3.3 Relaciones hábitat-caudal

Los modelos finalmente realizan el cálculo del hábitat potencialmente utilizable (HPU) y el área utilizable ponderada (WUA, por sus siglas en inglés), que se mide en metros cuadrados de espejo de agua por cada 1000 m de río estudiado en dirección longitudinal, aplicable a las especies indicadoras. Los valores de HPU/WUA se relacionan a través de curvas de caudal-hábitat para diferentes escenarios de caudal, llegándose a establecer los caudales necesarios para mantener las especies indicadoras y, por tanto, la biodiversidad del río.



Fuente: UVA-Universidad de Valladolid (2017)

La determinación del requerimiento de caudal para la especie indicadora puede realizarse de 4 formas (Jowett, 1997): i) reteniendo un porcentaje del hábitat con un caudal medio; ii) fijando un caudal que permita un hábitat mínimo; iii) determinándolo como un porcentaje de excedencia de la curva de duración del hábitat; o iv) fijando el caudal donde se produce un punto de quiebre en la curva de habitabilidad (HPU v/s caudal), siendo este último el más común (Servicio de Evaluación Ambiental de Chile, 2016).

Cuando se aplican modelos de simulación del hábitat, es necesario establecer escenarios de caudales que permitan apreciar los cambios que se generan a través del HPU a nivel mensual y de acuerdo con el requerimiento de las especies indicadoras a fin de establecer rangos de variación aceptables.

Etapa V. Verificación de los caudales ecológicos adoptados

Introducción

Una vez establecidos los caudales ecológicos, es necesario que sean verificados considerando el efecto de la operación del embalse en cuanto a cantidad, régimen y calidad del agua que es desfogada hacia el cauce natural. El manejo del embalse dependerá del tipo de aprovechamiento: riego, abastecimiento humano o generación de energía; cada uno tiene su propia dinámica de demanda y dependerá también de los aportes y pérdidas del embalse. En conjunto, estas variables se verán reflejadas en las reglas de operación.

La verificación de los caudales ecológicos consistirá entonces en constatar (a través de inspección visual de los resultados o mediante modelos de simulación) que, en la situación con proyecto, se garantice la cantidad, régimen y calidad del agua destinada a cubrir los requerimientos de la biodiversidad.

Verificación del cumplimiento: cantidad y régimen de los caudales ecológicos

La Guía propone como premisa conservar el régimen natural del río, independientemente de su importancia ambiental; es decir, que, incluso los caudales ecológicos determinados con métodos hidrológicos básicos deberían tener una variabilidad temporal.

Los caudales ecológicos determinados en la etapa IV que responden a los requerimientos de una o más especies indicadoras, cuando la importancia ambiental es media o alta, deben contrastarse con:

- Los caudales en régimen natural (sin presa): mínimos, medios y máximos; si corresponde, crecidas ordinarias; años con características de sequías moderadas, extremas y severas; años con humedad moderada y excesiva, y años con el fenómeno de El Niño y La Niña.
- Los caudales que serán evacuados por el embalse considerando sus reglas de operación, incluyendo el escenario de desfogue de fondo para la reducción del volumen muerto del embalse. Por tanto, se deberán analizar las curvas de descarga.

En función de la importancia ambiental y del tipo de proyecto, será necesario realizar un análisis de la situación con proyecto con una menor o mayor profundidad, aspecto que debe ser definido por el biólogo y el hidrólogo. Para ello, se tomará en cuenta que es en esta etapa cuando se deben realizar las correcciones necesarias con el objeto de cubrir desfases que pudieran ocurrir entre los caudales ecológicos establecidos de forma preliminar y los evacuados, que serán sensibles a las variaciones de la demanda, principalmente en proyectos hidroeléctricos, donde el régimen de restitución es fundamental para su análisis.

- Inicialmente, se plantea realizar un análisis de sensibilidad visual a través de un gráfico con los caudales en régimen natural, los caudales evacuados según la regla de operación y los caudales ecológicos establecidos en la etapa IV para facilitar el análisis de posibles alteraciones adicionales al régimen definido. Si los caudales ecológicos establecidos no son afectados por el régimen definido por la operación del embalse, se ratifican los valores y se emplean como otro usuario del embalse.
- Si existen dudas sobre posibles alteraciones que podrían afectar los caudales ecológicos, se sugiere emplear para la evaluación exhaustiva del régimen de caudales (sin y con proyecto) el método de rangos de variabilidad (RVA) propuesto por Richter et al., (1996), el cual fue

Figura 3.22
Actividades de la etapa V del procedimiento

Fuente: Elaboración propia



implementado en la aplicación informática de acceso libre *Indicators of Hydrologic Alteration* (IHA), desarrollada por The Nature Conservancy. Dicha aplicación proporciona la variación de parámetros hidrológicos antes de la intervención y con la presa, tomando en cuenta los hidrogramas naturales y los hidrogramas resultado de las reglas de operación del sistema. No obstante, es posible también aplicar otras herramientas de simulación hidrológica empleadas en el estudio hidrológico del proyecto.

- Cuando la importancia ambiental sea alta y, en casos particulares, cuando sea media, se deberán analizar de forma especial las crecidas de 1, 3 y 6 años, que son las que dan formación al cauce con el lavado de sedimentos y permiten la movilidad de los nutrientes que mantienen la vida en las riberas de los ríos. Por lo expuesto, será necesario conocer la frecuencia de las crecidas y su impacto. En tal situación, será imprescindible considerar el régimen de las crecidas ordinarias en el establecimiento de los caudales ecológicos, que, a su vez, deberá ser incluido en las reglas de operación del embalse.

Verificación del cumplimiento: calidad de los caudales ecológicos

La calidad del agua en un embalse puede verse afectada en diferente grado durante su llenado y su operación. En la fase de llenado, es posible que, debido a la descomposición de la materia orgánica, se altere notablemente la calidad del agua, dependiendo por supuesto del entorno físico-biótico donde se desarrolle el proyecto; durante la operación, podría alterarse la calidad del agua si el embalse tiende a eutrofizarse o si se presentara una estratificación térmica de relevancia.

En ambos casos, la calidad del agua que se desfogue al canal natural dependerá de dos factores fundamentales:

- La ubicación del punto de toma respecto a la altura de la presa y de los procesos que se generen en el embalse (eutrofización, estratificación térmica, etc.).
- El tipo de descarga, si es directa o es resultado de la restitución del agua después de turbinada.

En proyectos donde se califica la alteración del sistema hídrico como alta es posible que, por la altura de la presa y por la magnitud del embalse, se presente una estratificación térmica o eutrofización durante su operación. Una situación así debe ser analizada con modelos de calidad de agua que deberían elaborarse como parte del proyecto de ingeniería y de medio ambiente, y utilizarse en el estudio de caudales ecológicos con objeto de inferir el área de impacto en el río (distancia a la cual se restituye la calidad del agua) y posibles medidas adicionales de mitigación, si fuera posible. También se deberá considerar la altura a la cual se realiza

la toma, ya que suele realizarse próxima al fondo, donde las aguas pueden ser anóxicas y tener mayor contaminación por descomposición orgánica. En las situaciones con y sin proyecto, el análisis del cumplimiento del requisito “calidad” puede analizarse con el IIH descrito en el anterior acápite, siendo posible incorporar, en su determinación, los resultados de un modelo de calidad del agua.

Cuando la alteración al sistema hídrico es media, es posible que se presenten los fenómenos señalados y, aunque debería ser menos probable que su efecto sea elevado, este debe evaluarse de cualquier forma. Es mejor aún si se cuenta con un modelo de calidad o se hace a través de inferencias justificadas en función de todos los factores que los pueden generar (descritos en el capítulo 2 de la presente Guía).

En proyectos de menor magnitud, con alteraciones bajas al sistema hídrico, es necesario realizar una inferencia de la situación con proyecto. Por su tamaño, no debería causar una estratificación térmica; sin embargo, todos los embalses tienen el riesgo de eutrofización si no tienen control.

Verificación de cantidad y calidad en proyectos con alteraciones altas al sistema hídrico

Si la importancia ambiental es alta, se debería calcular el índice de integridad del hábitat (IIH) a partir de datos hidrológicos, hidráulicos y de calidad del agua para la situación sin proyecto, e inferir la situación con proyecto, con la alteración del caudal del río. Según la “Metodología para la estimación y evaluación de caudal ambiental en proyectos que requieren licencia ambiental” de Colombia (que puede extrapolarse a otros ámbitos físicos), dos son los aspectos generales que conforman el IIH: la cantidad y la calidad del hábitat para las comunidades bióticas (perifiton, macroinvertebrados, vegetación de ribera y peces). La cantidad de hábitat se mide como el área disponible para cada comunidad, mientras que la calidad depende de los requerimientos de cada comunidad. Desde el punto de vista de calidad, se tienen en cuenta los nutrientes y la profundidad para el perifiton, la materia orgánica para los invertebrados, la disponibilidad del agua para la vegetación ribereña, la profundidad, la velocidad de la corriente, la conectividad y el oxígeno disuelto para los peces. Las variables que considera el IIH se resumen en el cuadro 3.27.

Cuadro 3.27

Métricas seleccionadas para la construcción del índice de integridad del hábitat (IIH) para la determinación de caudales ambientales en ríos colombianos

Fuente: Metodología para la Estimación y Evaluación del Caudal Ambiental en Proyectos que Requieren Licencia Ambiental, Bogotá D.C. 2013
http://portal.anla.gov.co/documentos/institucional/Metodologia_Caudal_Ambiental.pdf

Variable	Tipo	Descripción
Profundidad relativa	Disponibilidad del hábitat	[Ancho medio de la superficie del agua] / [Profundidad media] del tramo. Corrientes anchas y someras proveen poco hábitat y se calientan excesivamente. Un valor alto de esta métrica corresponde a sitios menos apropiados para el desarrollo de la biota.
Ancho relativo	Disponibilidad del hábitat	[Ancho máximo de la planicie inundable] / [Ancho medio del canal]. El ancho máximo de la planicie es ocupado por los caudales máximos. Valores bajos corresponden a lugares con menor interacción entre la zona riparia y el río. Por lo tanto, esta relación se hace mayor en sitios más favorables para la biota.
Diversidad de hábitats	Disponibilidad del hábitat	[Profundidad real del flujo] / [Profundidad normal del flujo]. Una mayor diversidad de hábitats (flujo no uniforme) favorecerá un mejor desarrollo de los distintos grupos de organismos.
Variabilidad de la corriente	Disponibilidad del hábitat	[Velocidad promedio máxima] / [Velocidad media]. Una mayor variabilidad de la velocidad de las corrientes ofrece mejores oportunidades para el desarrollo de una biota más diversa.
Saturación de oxígeno	Calidad del hábitat	Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en el agua. Valores altos de saturación muestran un ambiente físico más apropiado para el buen desarrollo de la biota.
Relación de nutrientes	Calidad del hábitat	[Nitrógeno total] / [Fosforo total]. Una relación ideal de estos dos nutrientes para la biota fluctúa entre 14:1 y 20:1. Relaciones por debajo de 7:1 y por encima de 20:1 desfavorecen un buen desarrollo de los organismos.
Demanda béntica	Calidad del hábitat	Cantidad de oxígeno requerido por los organismos bénticos para degradar la materia orgánica (g O ₂ m ⁻² d ⁻¹). Valores altos, pero no exagerados, indican una buena disponibilidad de materia orgánica para los individuos de hábitat bentónico.

Cuadro 3.28

Variables físicas y químicas, y sus puntajes, utilizadas en la construcción del índice de integridad del hábitat (IIH) para la determinación de caudales ambientales en ríos colombianos

Fuente: Metodología para la Estimación y Evaluación del Caudal Ambiental en Proyectos que Requieren Licencia Ambiental, Bogotá D.C. 2013
http://portal.anla.gov.co/documentos/institucional/Metodologia_Caudal_Ambiental.pdf

Variable	Puntaje		
	0	0,5	1
Profundidad relativa (PR)	>200	5-50	<0,5
Ancho relativo (AR)	<2	2-5	>5
Diversidad de hábitats (DH)	<0,2	0,2-4	>4
Variabilidad de la corriente (VC)	<1,2	1,2-1,5	>1,5
% Saturación de oxígeno (SO)	<10 %	10-90 %	>90 %
Relación de nutrientes (RN)	<3 ó >30	3-6 ó 14-30	6-14
Demanda béntica (DM)	<0,5 ó >10	2-10	0,5-2

El puntaje de las variables se encuentra entre 0 y 1, representando 0 a sitios en donde la variable muestra condiciones de hábitat poco apropiadas para la biota y 1 donde la variable muestra sitios de buenas características ambientales. El IIH es la suma de los puntajes de cada variable, dividido por el número de variables, fluctuando por tanto entre 0 y 1.

$$IIH = (Puntaje PR + Puntaje AR + Puntaje DH + Puntaje VC + Puntaje SO + Puntaje RN + Puntaje DM) / 7$$

De acuerdo con el puntaje obtenido en el IIH, la integridad del hábitat se clasifica de acuerdo con el cuadro 3.29.

El IIH se calcula en las situaciones sin y con proyecto; en el escenario con proyecto el IIH no debería bajar de categoría. Un descenso implicaría un impacto potencial negativo en la integridad del hábitat con los caudales ecológicos propuestos y obligaría a realizar ajustes a los valores establecidos.

Cuadro 3.29

Puntajes del IIH para la determinación de caudales ambientales en ríos colombianos

Fuente: Metodología para la Estimación y Evaluación del Caudal Ambiental en Proyectos que Requieren Licencia Ambiental, Bogotá D.C. 2013
http://portal.anla.gov.co/documentos/institucional/Metodologia_Caudal_Ambiental.pdf

Puntaje del IIH	Interpretación	Implicaciones ecológicas
0-0,2	Pobre integridad del hábitat	Hábitat inapropiado para el desarrollo de la biota o que genera comunidades de baja diversidad y reducida abundancia.
0,21-0,5	Baja integridad del hábitat	Las condiciones de hábitat son poco apropiadas para el desarrollo de organismos.
0,51-0,8	Moderada integridad del hábitat	Las condiciones del hábitat aseguran un aceptable funcionamiento de los organismos.
0,81-1	Alta integridad del hábitat	Hábitat con muy buenas condiciones para la biota, que estimula el establecimiento de comunidades diversas y bien representadas.

Caudales ecológicos a aplicar

Una vez verificados los caudales ecológicos en cuanto a cantidad, régimen y calidad en la situación con proyecto, será posible emplearlos como parte del usuario ecológico del embalse.

Glosario

Anóxico. Ambiente que carece de oxígeno. Esta condición puede presentarse en embalses, donde existe un limitado intercambio de agua y cuando existen procesos de eutrofización en progreso, situaciones en las que el oxígeno disuelto está agotado.

Autótrofos. Organismos que tienen la capacidad de elaborar su propio alimento a partir de sustancias inorgánicas, tales como los elementos no vivos del planeta (luz, agua, etc.). Entre los organismos autótrofos más importantes y comunes encontramos a las plantas ya que las mismas realizan su propia síntesis alimentaria, utilizando elementos como el agua y la luz solar para elaborar su alimento.

Bentos macroinvertebrados. Organismos que se pueden ver a simple vista y viven en fondos de lagos y ríos adheridos a diferentes sustratos.

Biodiversidad. Término que hace referencia a la amplia variedad de seres vivos sobre la Tierra y los patrones naturales que la conforman, resultado de miles de millones de años de evolución según procesos naturales y también de la influencia creciente de las actividades del ser humano. La biodiversidad comprende igualmente la variedad de ecosistemas y las diferencias genéticas dentro de cada especie (diversidad genética), que permiten la combinación de múltiples formas de vida y cuyas mutuas interacciones con el resto del entorno fundamentan el sustento de la vida sobre el mundo.

Bioindicadores. Atributos de los sistemas biológicos empleados para detectar cambios en la calidad del hábitat, alteraciones ambientales de diversos tipos o la existencia de concentraciones de determinados contaminantes en los sitios donde se encuentran (o se ausentan), entre otros.

Bofedal. Humedal localizado en las zonas altoandinas.

Briozoarios. Filo de pequeños animales acuáticos sésiles que viven en colonias pequeñas que forman finas incrustaciones sobre rocas o algas.

Capacidad biogénica. Valor nutritivo del agua desde el punto de vista de la alimentación de los peces.

Coleópteros. Orden de insectos que abarca alrededor de 375 000 especies descritas.

Comunidad. Conjunto o grupo de diferentes especies que son imprescindibles para el equilibrio de un ecosistema y que comparten un mismo hábitat.

Criófilas. Plantas adaptadas a las bajas temperaturas (menores de 10 °C) y no toleran un aumento de la temperatura.

Curvas de preferencia. Representan las preferencias de una especie en una etapa de desarrollo. Se introducen en forma de curvas que relacionan los valores de una variable con un índice de preferencia, que varía entre 0 (preferencia mínima, para valores no aceptables de la variable) y 1 (valores de máxima preferencia). Su cálculo se basa en datos medidos en los puntos donde se sitúan los peces (datos de uso) y datos sobre el hábitat disponible en el momento del muestreo (disponibilidad), ya que la preferencia del pez está en función del espectro ecológico de la especie y del hábitat disponible.

Ecología. Rama de la biología que estudia las relaciones de los diferentes seres vivos entre sí y con su entorno, y cómo estas interacciones entre los organismos y su ambiente afectan a propiedades como la distribución o la abundancia.

Ecología trófica. Rama o especialidad de la ecología que se encarga del estudio de los flujos naturales de energía y materia en los ecosistemas.

Ecosistema. Es el conjunto de especies de un área determinada que interactúan entre ellas, con su ambiente abiótico –mediante procesos como la depredación, el parasitismo, la competencia y la simbiosis– y con su ambiente, al desintegrarse y volver a ser parte del ciclo de energía y de nutrientes. Las especies del ecosistema, incluyendo las bacterias, los hongos, las plantas y los animales dependen unas de otras. Las relaciones entre las especies y su medio resultan en el flujo de materia y energía del ecosistema.

Epilimnion. Capa superficial del agua de un lago, en la cual la temperatura es más elevada en verano y más rica en organismos.

Especies autóctonas. Una especie nativa, especie indígena o autóctona es una especie que pertenece a una región o ecosistema determinados. Su presencia en esa región es el resultado de fenómenos naturales sin intervención humana (pasada o actual).

Especie indicadora. Organismo cuya presencia, ausencia o abundancia refleja una condición ambiental específica o rasgo característico del medio ambiente.

Especies introducidas. Especie introducida, especie foránea, especie alóctona o especie exótica es una especie no nativa del lugar o del área en que se la considera introducida. Ejemplares han sido transportados por los seres humanos, ya sea accidental o deliberadamente, a una nueva ubicación donde la especie puede o no llegar a establecerse. Las especies introducidas pueden dañar o no el ecosistema en el que se introducen, alterando o no el nicho ecológico de otras especies. Si una especie resulta dañina, produciendo cambios importantes en la composición, la estructura o los procesos de los ecosistemas naturales o seminaturales, poniendo en peligro la diversidad biológica nativa (en diversidad de especies, diversidad dentro de las poblaciones o diversidad de ecosistemas) se la denomina especie invasora.

Estratificación térmica. Clasificación según la frecuencia y el periodo del año de la estratificación basada en el gradiente térmico y la profundidad.

Estuario. Cuerpo de agua semicerrado, como la desembocadura de un río o una bahía costera, donde la salinidad es intermedia entre agua salada y dulce, y las mareas actúan como regulador físico o fuente de energía.

Eufótica. Capa superficial de un cuerpo de agua donde penetra suficiente luz para permitir que se produzca fotosíntesis, hasta una profundidad en que la intensidad de la luz disminuye al 1 % de luz incidente.

Eutrófico. Referente al organismo que presenta un buen estado de nutrición y al medio nutritivo que permite alcanzar este estado.

Fitoplancton. Organismos acuáticos de origen vegetal que habitan en los mares, lagos y ríos, caracterizados por ser extremadamente pequeños y anatómicamente muy sencillos.

Hábitat. Es el ambiente que ocupa una población biológica. Consiste en el espacio que reúne las condiciones adecuadas para que la especie pueda residir y reproducirse, perpetuando su presencia. Así, un hábitat queda descrito por los rasgos que lo definen ecológicamente, distinguiéndolo de otros hábitats en los que las mismas especies no podrían encontrar acomodo.

Heterótrofos. Son todos los seres vivos que requieren de otros para alimentarse, es decir, que no son capaces de producir su alimento dentro de su organismo, sino que deben consumir elementos de la naturaleza, ya sea constituidos como alimentos o sintetizados por otros organismos. Entre los heterótrofos más destacados sobresalen todos los animales, las bacterias y el ser humano.

Hidromorfia. Estado permanente o temporal de saturación de agua en el suelo que lleva asociado la existencia de condiciones reductoras.

Hipereutrófico. Enriquecimiento máximo de nutrientes; número excesivo de algas o plantas acuáticas.

Hipolimnion. Se refiere a la región baja de un lago, la cual se extiende al fondo del mismo.

Inercia térmica. Propiedad que indica la cantidad de calor que puede conservar un cuerpo y la velocidad con que lo cede o absorbe.

Índice de integridad biótica. Herramienta científica que asocia las influencias antropogénicas en un cuerpo de agua con la actividad biológica del mismo para identificar y clasificar los problemas de contaminación del agua.

Humedal. Es una zona de tierras, generalmente planas, cuya superficie se inunda de manera permanente o intermitentemente. Al cubrirse regularmente de agua, el suelo se satura, quedando desprovisto de oxígeno y dando lugar a un ecosistema híbrido entre los puramente acuáticos y los terrestres. Considerando que el concepto fundamental de un humedal o zona húmeda no es el agua como tal sino la "humedad", se puede hablar de "ecosistemas húmedos" interdependientes de las aguas, ya sean superficiales o subterráneas. La categoría biológica de humedal comprende zonas de propiedades geológicas diversas: ciénagas, esteros, marismas, pantanos y turberas, así como las zonas de costa marítima que presentan anegación periódica por el régimen de mareas (manglares).

Índices de idoneidad o índices de preferencia. Valores que muestran las relaciones entre las funciones que indican la conveniencia, para cada especie y etapa de desarrollo, de los distintos valores que toma una variable del hábitat, que suele ser la velocidad media de la columna de agua, la profundidad, el tipo de sustrato y el refugio para la fauna. Este índice varía entre 0 (valoración mínima, no aceptable) y 1 (máxima, idoneidad).

Índice de integridad del hábitat. Condición o capacidad del hábitat para soportar y mantener una comunidad de organismos adaptada, en donde existe un balance en el número y composición de las especies, así como una organización de los procesos funcionales.

Índice de integridad biótica. Herramienta científica que asocia las influencias antropogénicas en un cuerpo de agua con la actividad biológica del mismo para identificar y clasificar los problemas de contaminación del agua.

Ambientes lénticos. Cuerpos de agua cerrados que permanecen en un mismo lugar sin correr ni fluir, comprenden todas las aguas interiores que no presentan corriente continua; es decir, aguas estancadas sin ningún flujo de corriente, como los lagos, las lagunas, los esteros y los pantanos.

Ecosistema lotico. Ecosistema de un río, arroyo o manantial en el cual el movimiento del agua es predominantemente en una dirección, impulsado por la fuerza de la gravedad.

Macrobenetos. Organismos que habitan o se encuentran asociados al sedimento.

Macrófitas. Plantas acuáticas visibles a simple vista, incluyéndose cormófitos (plantas vasculares), briófitos, microalgas y cianobacterias.

Macroinvertebrados. Animales invertebrados, como insectos, crustáceos, moluscos y anélidos, entre otros, los cuales habitan principalmente en sistemas de agua dulce.

Mesohábitat. Tipo de hábitat con un moderado o bien equilibrado suministro de humedad.

Mesotrófico. Un lago mesotrófico es un cuerpo de agua con un nivel intermedio de productividad, mayor que el de un lago oligotrófico, pero menor que el de un lago eutrófico. Estos lagos tienen comúnmente aguas claras y mantienen lechos de plantas acuáticas sumergidas y niveles medios de nutrientes.

Metalimnion. La zona intermedia de transición de un lago entre la zona superior más caliente y la inferior más fría.

Microbiota. Término que se utiliza para designar los microorganismos que viven en un entorno específico, llamado asimismo microbioma. Estos microorganismos pueden ser hongos, levaduras, bacterias o virus.

Oligotrófico. Un lago oligotrófico es un cuerpo de agua con baja productividad primaria, como resultado de contenidos bajos de nutrientes. Estos lagos tienen baja producción de algas y, consecuentemente, poseen aguas sumamente claras, con alta calidad de agua potable. Las aguas superficiales de estos lagos tienen típicamente mucho oxígeno, por lo que soportan muchas especies de peces, como truchas de lago, que requieren aguas frías y bien oxigenadas. Su contenido de oxígeno es mayor en lagos profundos, por tener volúmenes hipolimnéticos más grandes.

Perifiton. Plantas y animales submarinos que se adhieren firmemente a superficies sólidas como rocas, troncos, apilamientos, hojas y tallos de plantas acuáticas, etc.

Periodo de retorno o recurrencia. Se define como el intervalo de recurrencia (T) al lapso promedio en años entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada. Este periodo se considera como el inverso de la probabilidad, del n -ésimo evento de los n registros. Donde: $T =$ Período de retorno (años).

Población. Es un conjunto de organismos o individuos de la misma especie que coexisten en un mismo espacio y tiempo, y que comparten ciertas propiedades biológicas, las cuales producen una alta cohesión reproductiva y ecológica del grupo.

Potencial Redox. Es una medida de la actividad de los electrones. Está relacionado con el pH y con el contenido de oxígeno. Es análogo al pH ya que el pH mide la actividad de protones y el potencial redox mide la de los electrones.

Producción primaria. Es la producción de materia orgánica que realizan los organismos autótrofos a través de los procesos de fotosíntesis o quimiosíntesis. La producción primaria es el punto de partida de la circulación de energía y nutrientes a través de las cadenas tróficas.

Producción secundaria. Es la generada por los organismos secundarios heterótrofos o consumidores a partir de los organismos primarios.

Régimen. Variabilidad intraanual e interanual que exhibe una tendencia de evolución natural del río o cuerpo de agua. No son evidentes alteraciones antropogénicas.

Reófilas. Se aplica a las plantas que crecen en corrientes de aguas impetuosas.

Ripícola. Ubicado en los márgenes u orillas del mar, de un río o en islotes de un curso de agua.

Servicios ambientales. Son aquellos beneficios que proveen los ecosistemas a las personas para que estas, a su vez, hagan uso de ellos con el fin de mejorar su calidad de vida. Los ecosistemas proveen a la sociedad de una amplia gama de servicios para su subsistencia. Los beneficios que proveen dichos servicios pueden clasificarse de distintas formas. Por ejemplo, atendiendo a la relación entre el ecosistema y la provisión del servicio estos beneficios pueden ser de dos tipos:

- **Directos:** producción de agua o alimentos (servicios de aprovisionamiento), regulación de ciclos hídricos o de degradación de suelos, de plagas y enfermedades (servicios de regulación).
- **Indirectos:** se relacionan con el funcionamiento de procesos del ecosistema que generan los servicios directos, como el proceso de fotosíntesis y el ciclo de nutrientes, entre otros. Estos servicios otorgados por dichos ecosistemas, tales como el control de la erosión, el mantenimiento de cauces de ríos y el secuestro de carbono, son denominados servicios ambientales.

Tiempo de residencia. Es la relación entre el volumen de un embalse y el caudal de entrada; es decir, es el tiempo promedio en el que una parcela de agua que ingresa al depósito se demora en salir.

Topobatimetría. Medición de las profundidades en conjunto con la medición de la forma en planta de un cuerpo de agua; es decir, topografía (medición del terreno u orillas) y batimetría (medición de la profundidad del agua).

Vegetación riparia. Fase intermedia ubicada entre el suelo y un río o arroyo, protegiendo los medios acuáticos de sedimentación excesiva, escurrimiento de aguas de superficie contaminadas y erosión.

Zona ribereña. Interfaz entre la tierra y un río. La vegetación ribereña se compone de comunidades de plantas que crecen a lo largo de las márgenes del río. Estas plantas se caracterizan por utilizar el agua que se filtra en las márgenes. La vegetación ribereña es importante por su biodiversidad y por su papel en la estabilización de las propias márgenes de los ríos. Las zonas ribereñas se producen de muchas formas –entre las que se incluyen pastizales, bosques y humedales– y requieren la humedad periódica de las crecidas y las inundaciones para deshacerse de sedimentos y promover la germinación y el crecimiento de las plantas.

Zooplankton. Fracción del plancton constituida por seres que se alimentan por ingestión de materia orgánica ya elaborada. Está constituido por protozoos, larvas de animales más grandes, como esponjas, gusanos, equinodermos, moluscos o crustáceos, y de otros artrópodos acuáticos.

Bibliografía

Sobre normativa existente

Página	Título	Autor	Archivo	País de referencia
www.cohife.org/OLD/documentos/caudal_amb_crist.pptx	CAUDAL ECOLOGICO LEGISLACION ARGENTINA	Cristina Del Campo-SSRH-2015	caudal_amb_crist.pptx	Argentina
https://dga.mop.gob.cl/legislacionynormas/normas/Reglamentos/Reglamento_Caudal_Ecologico.pdf	DECRETO NO. 014	Contraloría General - Toma de razón	REGLAMENTO_CAUDAL_ECOLOGICO.PDF	Chile
https://www.researchgate.net/publication/237904217_Caudal_ecologico_definiciones_metodologias_aplicacion_en_la_zona_Andina	CAUDAL ECOLÓGICO: DEFINICIONES, METODOLOGÍAS, APLICACION EN LA ZONA ANDINA	Gastón Aguilera-M. Pouilly	2012-AGUILERA&POUILLY%20(ACTA%20LILLO)%20.PDF	Zona Andina
http://jornada.pucp.edu.pe/derecho-de-aguas/wp-content/uploads/sites/8/2013/07/Texto-10.marcolegal_institucional_caudalesecologicos_ambientales_peru.pdf	ANÁLISIS DEL MARCO LEGAL E INSTITUCIONAL SOBRE CAUDALES ECOLÓGICOS/ AMBIENTALES EN EL PERÚ	IPROGA	Texto-10.marcolegalinstitucional_caudalesecologicosambientales_peru.pdf	Perú
http://sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2016/guia_caudal_ambiental.pdf	GUÍA METODOLÓGICA PARA DETERMINAR EL CAUDAL AMBIENTAL PARA CENTRALES HIDROELÉCTRICAS EN EL SEIA	Servicio de evaluación ambiental	GUIA_CAUDAL_AMBIENTAL.PDF	Chile
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166834/NMX-AA-159-SCFI-2012.pdf	NORMA MEXICANA NMX-AA-159-SCFI-2012 QUE ESTABLECE EL PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO EN CUENCAS HIDROLÓGICAS	Comisión federal de electricidad (CFE), et al	NMX-AA-159-SCFI-2012.pdf	México
http://www.chiledesarrollosustentable.cl/noticias/aprueban-reglamento-de-caudal-ecologico-minimo/#:~:text=De%20acuerdo%20con%20el%20documento,no%20pudiendo%20superar%20un%2040%25	APRUEBAN REGLAMENTO DE CAUDAL ECOLOGICO MINIMO			Chile
http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/1944/1/35212.pdf	CAUDALES AMBIENTALES, NECESIDAD DE SU RECONOCIMIENTO Y LINEAMIENTOS BÁSICOS PARA SU REGULACIÓN EN COSTA RICA	Emily Tatiana Guevara Torres	35212.pdf	Costa Rica
http://vidasilvestre.org.uy/wp-content/uploads/2011/12/Informe-caudales-ambientales.pdf	FORTALECIMIENTO DEL CONCEPTO DE CAUDALES AMBIENTALES COMO HERRAMIENTA PARA LA GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS	Lorena Rodríguez-Gallego, Christian Chreties, Magdalena Crisci	INFORME-CAUDALES-AMBIENTALES.PDF	Uruguay
http://www.cepal.org/samtac/noticias/documentosdetrabajo/1/23391/drsam00805.pdf	EVALUACIÓN DEL INSTRUMENTO CAUDAL ECOLÓGICO, PANORAMA LEGAL E INSTITUCIONAL EN CHILE Y BRASIL	Gabriela Jamett Domínguez	DRSAM00805.PDF	Chile, Brasil
https://www.yumpu.com/es/document/read/34723787/caudales-ambientales-en-la-legislacion-y-cazalac	CAUDALES AMBIENTALES: EN LA LEGISLACION Y POLITICA DE AGUAS	Mario Aguirre Programa de agua - UICN Sur		Varios
https://www.researchgate.net/publication/285574602_METODOLOGIA_PARA_LA_PROPOSTA_DE_CAUDALES_ECOLOGICOS_EN_FUNCION_DE_RESTRICCIONES_AMBIENTALES_y_DE_GESTION	METODOLOGÍA PARA LA PROPUESTA DE CAUDALES ECOLÓGICOS EN FUNCIÓN DE RESTRICCIONES AMBIENTALES Y DE GESTIÓN	Soares, Laura ; Santos, Hersilia		Varios
https://docplayer.es/19292185-Ministerio-de-ambiente-y-desarrollo-sostenible-autoridad-nacional-de-licencias-ambientales.html	METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN Y EVALUACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL EN PROYECTOS QUE REQUIEREN LICENCIA AMBIENTAL	Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible Autoridad Nacional de licencias ambientales	MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES.pdf	Colombia
http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/pan119123.pdf	RESOLUCION NO. 0691	GACETA OFICIAL DIGITAL, MIÉRCOLES 12 DE DICIEMBRE DE 2012	pan119123.pdf	Panamá

Continúa →

Página	Título	Autor	Archivo	País de referencia
http://repositorio.ub.edu.ar/bitstream/handle/123456789/1475/mesa3-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y	MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO: PANORAMA EN CHILE Y BRASIL	Lic. Gabriela Jamett Domínguez Universidad de Chile - Chile	MESA3-1.PDF	Chile, Brasil
http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002277/227701s.pdf	QUÉ SON LOS CAUDALES AMBIENTALES Y CUAL ES LA PERSPECTIVA DE SU APLICACIÓN EN URUGUAY	Viveka Sabaj Lorena Rodríguez-Gallego		Uruguay
https://www.portalces.org/sites/default/files/migrated/docs/marcolegalinstitucional_caudalesecologicosambientales_ecuador.pdf	ANÁLISIS DEL MARCO LEGAL E INSTITUCIONAL PARA CAUDALES ECOLÓGICOS EN EL ECUADOR	Dra. Verónica Arias Dr. Esteban Terneus	marcolegalinstitucional_caudales ecologicosambientales_ecuador.pdf	Ecuador
https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/3_lrh_ana_fc_0_2.pdf	LEY DE RECURSOS HIDRÍCOS Y SU RELACION CON CAUDALES ECOLÓGICOS	Fernando Chiok	3_lrh_ana_fc_0_2.pdf	Peru
http://www.redalyc.org/pdf/707/70711528005.pdf	MODELACIÓN DE LOS CAUDALES ECOLÓGICOS EN RÍOS DE VENEZUELA	Edilberto Guevara Pérez	70711528005.PDF	Venezuela
https://www.miteco.gob.es/es/agua/formacion/10%20-%20Establecimiento%20de%20caudales%20ecologicos%20en%20Espa%C3%B1a%2C%20nexo%20entre%20DMA%20y%20Directiva%20Habitats(FM)_tcm30-215707.pdf	ESTABLECIMIENTO DE CAUDALES ECOLÓGICOS NEXO ENTRE DMA Y DHABITATS	Fernando Magdaleno	10 - Establecimiento de caudales ecologicos en España, nexo entre DMA y Directiva Habitats(FM)_tcm30-215707	España
http://www.unirioja.es/dptos/dd/administrativo/seminarioaguas2012/ponencias/Palau_Caudales_y_Objjetivos_calidad_2.3.b.pdf	CAUDALES ECOLÓGICOS Y OBJETIVOS DE CALIDAD	Antoni Palau. DMACS. Universidad de Lleida y DMADS ENDESA. Junio de 2012.	PALAU_CAUDALES_Y_OBJETIVOS_UE CALIDAD_2.3.B.PDF	UE
https://www.chsegura.es/export/sites/chs/descargas/planificacionydma/planificacion/docsdescarga/Anejo_05_Regimen_Caudales_Ambientales.pdf	ANEJO Nº 5 IMPLANTACIÓN DEL RÉGIMEN DE CAUDALES ECOLÓGICOS	Gobierno De España	Anejo_05_Regimen_Caudales_Ambientales.pdf	España
http://www.aguasgrancanaria.com/pdfs/PlanHidro/1MemInfo1.pdf	PLAN TERRITORIAL ESPECIAL HIDROLOGICO DE GRAN CANARIA	Consejo Insular De Aguas Gran Canaria	1MemInfo1.pdf	España
http://www.aguasgrancanaria.com/pdfs/PlanHidro/1MemInfo2.pdf	PLAN TERRITORIAL ESPECIAL HIDROLOGICO DE GRAN CANARIA	Consejo Insular De Aguas Gran Canaria	1MemInfo2.pdf	España
http://www.chguadalquivir.es/documents/10182/48773/Cap_8.pdf/258a6ca5-7390-4154-9111-afd633188054	ANÁLISIS COMPARATIVO DE DIFERENTES NORMATIVAS EN LA UE	258A6CA5-7390-4154-9111-A1D633188054	CAP.8	UE
http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/rj_098-2016-ana.pdf	RESOLUCION JEFATURAL NO. 98-2016-ANA	Rep. del Perú	R.J_098-2016-ANA.PDF	Perú
http://www.dga.cl/legislacionynormas/normas/Reglamentos/Modifica_Decreto_14.pdf	REGLAMENTO PARA LA DET. DE CAUDAL ECOLÓGICO MÍNIMO	Min. Medio ambiente de Chile	MODIFICA_DECRETO_14.PDF	Chile
https://www.yumpu.com/es/document/read/14232689/introduccion-al-calculo-de-caudales-ecologicos-endesa	INTRODUCCIÓN AL CÁLCULO DE CAUDALES ECOLÓGICOS UN ANÁLISIS DE LAS TENDENCIAS ACTUALES	ENDESA Chile		Chile
http://editorial.umariana.edu.co/revistas/index.php/unimar/article/view/381/315	CAUDALES ECOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO Y LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA	Sandra Milena Madroñero Palacios	381-Texto del artículo-t284-1-10-20140730.pdf	Brasil
http://geovisor.fonag.org.ec/documents/824/download	ESTADO DEL ARTE DE CAUDALES ECOLÓGICOS	Ing. Daniela Rosero, MSC	AnalisisDelDesarrolloDe Metodologias_y_su ImplementacionEnEcuador.pdf	Ecuador

Sobre guías para el cálculo de caudales ecológicos

Página	Título	Autor	Archivo	País de referencia
http://sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2016/guia_caudal_ambiental.pdf	GUÍA METODOLÓGICA PARA DETERMINAR EL CAUDAL AMBIENTAL PARA CENTRALES HIDROELÉCTRICAS EN EL SEIA	Editor: Servicio de evaluación Ambiental-Chile	GUIA_CAUDAL_AMBIENTAL.PDF	Chile
http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/GUIA.pdf	GUÍA RÁPIDA PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS	Alianza WWF- Fundación Gonzalo Río Arronte, I.A.P.	GUIA.PDF	México
http://www.agua.unam.mx/humedales/assets/materialdifusion/WWF_ComoConservarLosRiosVivos.pdf	GUÍA SOBRE LOS CAUDALES ECOLÓGICOS	Jay O'Keeffe, Tom Le Quesne-WWF	WWF_COMOCONSERVARLOS RIOSVIVOS.PDF	México
https://www.researchgate.net/profile/Juan_Reyes-Gonzalez/publication/264457391_Guia_para_la_determinacion_de_caudal_ecologico_en_Mexico/links/53dfeb90cf2aede4b4a91d1/Guia-para-la-determinacion-de-caudal-ecologico-en-Mexico.pdf	GUÍA PARA LA DETERMINACION DE CAUDAL ECOLÓGICO EN MEXICO	La Alianza WWF-FGRA	WWF2011GuiaCaudalEcologico.pdf	México
http://info.igme.es/SidPDF/131000/466/131466_0000001.pdf	GUÍA METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS CAUDALES AMBIENTALES. CAPÍTULO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.	Gobierno de España	131466_0000001.PDF	España
http://www.uragentzia.euskadi.eus/contenidos/informacion/documentacion_plan_2015_2021/es_def/adjuntos/20151214/ANEJO_05_Q%20ECOL_Cantabrico%20Oriental.pdf	MEMORIA - ANEJO V CAUDALES ECOLÓGICOS	Plan Hidrológico Revisión 2015 - 2021	ANEJO_05_Q_ECOL_CANTABRICO ORIENTAL.PDF	España
https://gestionsosteniblede.lagua.files.wordpress.com/2016/04/proyecto-metodologia-para-caudal-ecologico.pdf	RESOLUCION JEFATURAL N° 00;1-2016-ANA	Rep. Perú	PROYECTO-METODOLOGIA-PARA-CAUDAL-ECOLOGICO.PDF	Perú
http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/7651/1/7720-0445651.pdf	CURVAS DE IDONEIDAD DE HÁBITAT PARA MACROINVERTEBRADOS BENTÓNICOS: UNA HERRAMIENTA PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES AMBIENTALES	William Cardona Duque	7720-0445651.PDF	Colombia
http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/6_mb_mp_0.pdf	MODELO BIOLÓGICO	Marc Pouilly	6_mb_mp_0.pdf	Zona Andina
http://www.cohife.org/OLD/documentos/PresentacionQecol_LH.pdf	CAUDAL AMBIENTAL EN CÓRDOBA ESTUDIOS REALIZADOS CON RELACIÓN A LA DETERMINACIÓN DE CAUDAL ECOLÓGICO EN RÍOS DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA.	Laboratorio de hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.	PresentacionQecol_LH.pdf	Argentina
http://ciga.pucp.edu.pe/wp-content/uploads/2017/02/4.-Marc-Pouilly-Caudal-ecol%C3%B3gico-y-Simulaci%C3%B3n-del-h%C3%A1bitat.pdf	CAUDAL ECOLÓGICO Y SIMULACIÓN DEL HÁBITAT	Marc Pouilly	4.-Marc-Pouilly-Caudal-ecológico-y-Simulación-del-hábitat.pdf	Perú
https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/metodologias-calculo-presas/files/assets/common/downloads/publication.pdf	METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES ECOLÓGICOS Y AMBIENTALES EN RÍOS REGULADOS POR PRESAS	Rebeca González Villela y Alfonso G. Banderas Tarabay	PUBLICATION.PDF	México
http://oa.upm.es/667/1/07200013.pdf	DETERMINACIÓN DE RÉGIMENES DE CAUDALES ECOLÓGICOS MÍNIMOS	Martín Mayo Rustarazo Ingeniero De Montes	07200013.9DF	España
http://hdl.handle.net/10251/13641	MODELOS DE IDONEIDAD DE MICROHÁBITAT PARA EL ESTUDIO DEL RÉGIMEN ECOLÓGICO DE CAUDALES	Martínez Capel, Francisco		España
http://www.santacruz.gov.ar/ambiente/audiencia_publica2017/Rio_Santa_Cruz/Estudios%20complementarios/2.%20Caudal%20Ecologico.pdf	ESTUDIO DE CAUDAL ECOLÓGICO APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS RÍO SANTA CRUZ- ARGENTINA	Universidad de Valladolid, España Grupo de ecohidrología fluvial	2. CAUDAL ECOLOGICO.PDF	Argentina
https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/21157/PantojaValenciaNatalia2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y	ESTIMACIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS MEDIANTE MÉTODOS HIDROLÓGICOS, HIDRÁULICOS Y ECOLÓGICOS EN LA QUEBRADA EL CONEJO (MOCOA-PUTUMAYO)	Natalia Pantoja Valencia Universidad Pontificia Javeriana	PantojaValenciaNatalia2017.pdf	Colombia

Continúa →

Página	Título	Autor	Archivo	País de referencia
http://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2100/1/Estimaci%C3%B3n_de_caudal%20ecol%C3%B3gico.pdf	ESTIMACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO POR LOS MÉTODOS 7Q10, Q 95% Y LOS FACTORES DE REDUCCIÓN DEL 25% EN EL RÍO OCCOA, A PARTIR DE LA GENERACIÓN DE CAUDALES DIARIOS UTILIZANDO EL MODELO AGREGADO DE TANQUES	Andrea del Pilar Cabra Soto, María Fernanda Corradine Moyano	Estimación_de_caudal ecológico.pdf	Colombia
https://circabc.europa.eu/webdav/CircaBC/env/wfd/Library/framework_directive/implementation_documents_1/information_consultation/spain/rbd-jucar/C-dRBMP-ES-RBD-Jucar-post-consultation/PHJ_Anejo05_QEco_11marzo.pdf	MEMORIA - ANEJO 5 RÉGIMEN DE CAUDALES ECOLÓGICOS DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR	Gobierno de España	PHJ_Anejo05_QEco_11marzo.pdf	España
http://www.inia.es/gcontrec/pub/153-165-(03)-El_regimen_1169109173125.pdf	EL RÉGIMEN NATURAL DE CAUDALES: UNA DIVERSIDAD IMPRESCINDIBLE, UNA DIVERSIDAD PREDECIBLE	C. Martínez Santa-María y J. A. Fernández Yuste	153-165-(03)-El_regimen_1169109173125.pdf	España
http://www.coagret.com/ficheros/200812/informe-coagret-caudales-ambientales.pdf	“CRITERIOS PARA LA IMPLANTACION DE CAUDALES ECOLÓGICOS”	Rafael Sánchez y Carles Ibáñez	informe-coagret-caudales-ambientales.pdf	España
http://geovisor.fonag.org.ec/documents/886/download	ESTRATEGIAS PARA LA APLICACIÓN DEL RÉGIMEN DE CAUDALES ECOLÓGICOS	Ing. Daniela Rosero L. Msc. Ing. Dunia González Z. Phd.	InformeAcciones_y_Mecanismos ParaImplementacionEstrategias CaudalesEcologicos.pdf	Ecuador
https://www.conservationgateway.org/Documents/IHAV7-1%20manual%20Spanish_0.pdf	INDICADORES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA VERSIÓN 7.1 MANUAL DEL USUARIO	The Nature Conservancy	IHAV7-1 manual Spanish_0.pdf	EEUU

Sobre estudios y proyectos relacionados con caudales ecológicos

Página	Título	Autor	Archivo	País de referencia
https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/21157/PantojaValenciaNatalia2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y	ESTIMACIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS MEDIANTE MÉTODOS HIDROLÓGICOS, HIDRÁULICOS Y ECOLÓGICOS EN LA QUEBRADA EL CONEJO (MOCOA-PUTUMAYO)	Natalia Pantoja Valencia Universidad Pontificia Javeriana	PantojaValenciaNatalia2017.pdf	Colombia
https://docplayer.es/58959432-Caudal-ambiental-en-cordoba-estudios-realizados-con-relacion-a-la-determinacion-de-caudal-ecologico-en-rios-de-la-provincia-de-cordoba.html	CAUDAL AMBIENTAL EN CÓRDOBA ESTUDIOS REALIZADOS CON RELACIÓN A LA DETERMINACIÓN DE CAUDAL ECOLÓGICO EN RÍOS DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA	Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. MPAGOT		Argentina
https://www.crq.gov.co/Documentos/Estimacion_Caudales_Ecologicos_UMC_Rio_Quindio.pdf	ESTIMACIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS MEDIANTE MÉTODOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS EN LA UMC RÍO QUINDÍO	Universidad del Quindío – Grupo de Investigación Cidera	Estimacion_Caudales_Ecologicos_UMC_Rio_Quindio	Colombia
http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/v14n2/art4.pdf	MODELACIÓN DE LOS CAUDALES ECOLÓGICOS EN RÍOS DE VENEZUELA	Edilberto Guevara Pérez	ART4.PDF	Venezuela
http://siar.minam.gob.pe/lima/download/file/fid/55205	ESTUDIOS TÉCNICOS DE CAUDALES ECOLÓGICOS EN LA CUENCA CHANCAY-HUARAL	TECNOMA	2807-QECO.PDF	Perú
http://www.santacruz.gov.ar/ambiente/audiencia_publica2017/Rio_Santa_Cruz/Estudios%20complementarios/2%20Caudal%20Ecologico.pdf	ESTUDIO DE CAUDAL ECOLÓGICO APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS RÍO SANTA CRUZ- ARGENTINA	Universidad de Valladolid, España Grupo de ecohidrología fluvial	2. CAUDAL ECOLÓGICO.PDF	Argentina
https://snia.mop.gob.cl/sad/ECO4921.PDF	DETERMINACIÓN DEL QMIN ECOLÓGICO DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO QUILLECO EN EL RÍO LAJA	Universidad de Concepción	ECO4921.PDF	Chile
http://planetaconsultores.net/wp-content/uploads/2014/02/Modelo-caudal-ambiental1.pdf	Q-ESA: UN MODELO PARA EL CAUDAL AMBIENTAL	Zárate P., Manuel F. Espinosa, Daly Flores, Eduardo	MODELO-CAUDAL-AMBIENTAL1.PDF	Panamá
http://repositorio.ulvr.edu.ec/bitstream/44000/1194/1/T-ULVR-1303.pdf	TEMA: ANÁLISIS DE LA LEY AMBIENTAL EN EL ECUADOR, ACERCA DEL IMPACTO CAUSADO A LOS CAUDALES ECOLÓGICOS POR OBRAS DE INFRAESTRUCTURA HIDROENERGÉTICAS	Priscila Natividad Zambrano Zambrano	T-ULVR-1303.PDF	Ecuador
http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/diagnostico_ aprobado.pdf	DIAGNOSTICO SOBRE LOS CAUDALES ECOLÓGICOS EN EL PERU (PRIMERA FASE)	Contexto nacional e internacional	DIAGNOSTICO_APROBADO.PDF	Perú
http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers14-09/010062846.pdf	CAUDAL AMBIENTAL: PERSPECTIVAS DE EVALUACIÓN EN EL SISTEMA TDPS		010062846.PDF	Perú-Bolivia
https://www.researchgate.net/publication/280248147_Estimacion_de_caudales_ecologicos_basada_en_simulacion_del_habitat_fisico_en_un_pequeno_rio_del_sudeste_de_Brasil	ESTIMACIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS BASADA EN SIMULACIÓN DEL HÁBITAT FÍSICO EN UN PEQUEÑO RÍO DEL SUDESTE DE BRASIL	Da Costa, M.R., Moretti Mattos, T, Muñoz-Mas, R, Martínez-Capel, F, Fernandes, V.H., Araújo, F.G.		Brasil
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382016000100005	CAUDAL ECOLÓGICO DEL RÍO CHAMBAS EN LA PROVINCIA CIEGO DE ÁVILA	Oscar Brown Manrique		Cuba
https://sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2016/guia-caudal-ambiental.pdf	GUÍA METODOLÓGICA PARA DETERMINAR EL CAUDAL AMBIENTAL PARA CENTRALES HIDROELÉCTRICAS EN EL SEIA	Editor: Servicio de evaluación ambiental-Chile	GUIA_CAUDAL_AMBIENTAL.PDF	Chile
https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/metodologias-calculo-presas/files/assets/common/downloads/publication.pdf	METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES ECOLÓGICOS Y AMBIENTALES EN RÍOS REGULADOS POR PRESAS	Rebeca González Villela y Alfonso G. Banderas Tarabay	PUBLICATION.PDF	México
https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/11036/6A407.pdf?sequence=1&isAllowed=y	MODELAMIENTO Y MANEJO DE LAS INTERACCIONES ENTRE LA HIDROLOGÍA, LA ECOLOGÍA Y LA ECONOMÍA EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES AMBIENTALES	Tesis d e Maestría 2012 Emerson A. Parra Rodríguez I.A	6A407.pdf	Colombia

Sobre embalses y aspectos bióticos de interés

Página	Título	Autor	Archivo	País de referencia
https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/75/4/Unidade_2.pdf	UNIDAD 2: CALIDAD DE AGUA EN EMBALSES	MOACYR	Unidade_2.pdf	Brasil
http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v25n2/v25n2a02.pdf	ESTADO TRÓFICO DE UN LAGO TROPICAL DE ALTA MONTAÑA: CASO LAGUNA DE LA COCHA	Mery Liliana López Martínez, Sandra Milena Madroñero Palacios	v25n2a02.pdf	Colombia
https://www.bivica.org/files/presas-inventario_a.pdf https://www.bivica.org/files/presas-inventario_b.pdf	INVENTARIO NACIONAL DE PRESAS BOLIVIA 2010	Ministerio de Medio Ambiente y Agua Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego	presas-inventario_a.pdf presas-inventario_b.pdf	Bolivia
https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/B-S2-P1_Diego%20G%20Jalon-PPTACC.pdf	LA REGULACIÓN DE LOS CAUDALES Y SU EFECTO EN LA BIODIVERSIDAD	Diego García de Jalón	B-S2-P1_Diego G Jalon-PPTACC.pdf	España
https://books.google.com.bo/books?id=UJ5ADwAAQBAJ&pg=PA175&lpg=PA175&dq=INTERFERENCIA+DE+LOS+EMBALSES,+Y+SU+R%C3%89GIMEN+DE+EXPLORACION+CON+ALGUNOS+PROCESOS+Y+ESPECIES+RELACIONADOS+CON+LA+FAUNA&source=bl&ots=fSSsUi53_M&sig=ACfU3U2mFhmLJ6w1rWtkz_GCe96IGgwPnQ&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKewjuf3xoKbuAhWCpFkKHVxnC6QQ6AEwAXoECAEQAg#v=onepage&q=INTERFERENCIA%20DE%20LOS%20EMBALSES%20Y%20SU%20R%C3%89GIMEN%20DE%20EXPLORACION%20CON+ALGUNOS+PROCESOS+Y+ESPECIES+RELACIONADOS%20Y%20LA%20FAUNA&f=false	INTERFERENCIA DE LOS EMBALSES, Y SU RÉGIMEN DE EXPLOTACIÓN, CON ALGUNOS PROCESOS Y ESPECIES RELACIONADOS CON LA FAUNA	Santiago Hernández Fernández Universidad de Extremadura, Cáceres	Páginas 175-181	España
http://www.seprems.es/st_agua_f/presas-su_relacion_con_el_medio_ambiente.pdf	PRESAS Y SU RELACION CON EL MEDIOAMBIENTE	Alberto Ruiz Del Portal Mateos	PRESAS-SU_RELACION_CON_EL_MEDIO_AMBIENTE.pdf	España
http://www2.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n78ne/eutrofia2.pdf	MÉTODOS PARA IDENTIFICAR, DIAGNOSTICAR Y EVALUAR EL GRADO DE EUTROFIA	Daniela Paola Moreno Franco, et al	EUTROFIA2.PDF	México
http://www.fcnyu.unlp.edu.ar/catedras/proteccion/tp1/tp1.pdf	EUTROFIZACIÓN	Cátedra de protección y conservación de la naturaleza	TP1.PDF	Argentina
https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7932/6/UPS-CT004772.pdf	APLICACIÓN DEL MÉTODO PHABSIM PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDAL ECOLÓGICO EN EL RÍO CHULCO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO MANCHANGARA	Adriana Soledad Sichique Sanchez, et al	UPS-CT004772.PDF	Ecuador
http://datos.imta.mx/indicadores/Capitulo3-Vegetacion-riparia.pdf	CAPÍTULO 3 VEGETACIÓN RIPARIA	CAPÍTULO 3-VEGETACIÓN-RIPARIA.PDF	Capitulo3-Vegetacion-riparia.pdf	México
http://www.minam.gob.pe/diversidadbiologica/wp-content/uploads/sites/21/2014/02/M%C3%A9todos-de-Colecta-identificaci%C3%B3n-y-an%C3%A1lisis-de-comunidades-biol%C3%B3gicas.compressed.pdf	MÉTODOS DE COLECTA, IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE COMUNIDADES BIOLÓGICAS: PLANCTON, PERIFITON, BENTOS (MACROINVERTEBRADOS) Y NECTON (PECES) EN AGUAS CONTINENTALES DEL PERÚ	Universidad Nacional Mayor de San Marcos Museo de Historia Natural Departamentos de Limnología e Ictiología	Métodos-de-Colecta-identificaci%C3%B3n-y-an%C3%A1lisis-de-comunidades-biol%C3%B3gicas.compressed.pdf	Perú
https://www.biodiversitylibrary.org/item/126977#page/3/mode/tup	HUMEDALES Y PECES, UNA CONEXIÓN VITAL	Administración Nacional de los océanos y la atmósfera (NOAA)		Estados Unidos
https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4015812.pdf	LOS MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS COMO INDICADORES DEL ESTADO ECOLÓGICO DE LOS RÍOS	Rubén Ladrera Fernández	DIALNET-LOSMACROINVERTEBRADOSACUATICOSCOMOINDICADORRESDELES-4015812.PDF	España
http://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAAnexos/IEA-EMCH-C4/\$File/EMCH-C4.pdf	AVES ACUÁTICAS COMO BIOINDICADORES EN LOS HUMEDALES	Andy J. Green y Jordi Figuerola Dpto. de Biología Aplicada, Estación Biológica de Doñana, Consejo Superior de Investigaciones	EMCH-C4.pdf	España
http://www.ehu.es/ikastorratza/t1_alea/macro.pdf	MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS COMO INDICADORES BIOLÓGICOS: UNA HERRAMIENTA DIDÁCTICA	Rubén Ladrera, María Rieradevall y Narcís Prat	Macro.pdf	España
http://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janium/Documentos/7143.pdf	LOS PECES COMO INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS	Velázquez Velázquez, E. y M.E. Vega Candejas, 2004	7143.pdf	México

Continúa →

Página	Título	Autor	Archivo	País de referencia
https://www.researchgate.net/publication/278715175_DESARROLLO_DEL_SOFTWARE_RHABSIM_30_EN_ESPAÑOL_PARA_EL_ESTUDIO_DEL_HABITAT_FLUVIAL_MEDIANTE_EL_SISTEMA_PHABSIM	DESARROLLO DEL SOFTWARE "RHABSIM 3.0" EN ESPAÑOL PARA EL ESTUDIO DEL HÁBITAT FLUVIAL MEDIANTE EL SISTEMA PHABSIM	Juan Manuel Diez Hernández y Thomas R. Payne		España
https://www.researchgate.net/publication/318043527_Importancia_y_utilidad_de_los_bioindicadores_acuaticos	IMPORTANCIA Y UTILIDAD DE LOS BIOINDICADORES ACUÁTICOS	Ana Isabel Tenjo Morales		Colombia
http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-66432014000100002	EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE VEGETACIÓN RIBERENA EN DOS CUENCAS COSTERAS DEL SUR DE CHILE MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL ÍNDICE QBR, COMO BASE PARA SU PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN TERRITORIAL	Sebastián Carrasco, Enrique Hauenstein, Fernando Peña-Cortés, Carlos Bertrán, Jaime Tapia & Luis Vargas-Chacoff		Chile
https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13641/Modelos%20idoneidad%20de%20microhabitat%20y%20caudales%20ecologicos.pdf	MODELOS DE IDONEIDAD DE MICROHÁBITAT PARA EL ESTUDIO DEL RÉGIMEN ECOLÓGICO DE CAUDALES	Martínez Capel, Francisco	Modelos idoneidad de microhabitat y caudales ecológicos.pdf	España
https://www.researchgate.net/profile/Rebeca_Villela/publication/242587335_Estudio_Comparativo_de_Tres_Metodologias_para_el_Manejo_y_Calculo_de_Caudales_Ambientales_en_el_Rio_Santiago_Nayarit_Mexico/links/54b535940cf26833efd079d5/Estudio-Comparativo-de-Tres-Metodologias-para-el-Manejo-y-Calculo-de-Caudales-Ambientales-en-el-Rio-Santiago-Nayarit-Mexico.pdf	ESTUDIO COMPARATIVO DE TRES METODOLOGÍAS PARA EL MANEJO Y CÁLCULO DE CAUDALES AMBIENTALES EN EL RÍO SANTIAGO, NAYARIT, MÉXICO.	Rebeca González Villela y Alfonso Banderas Tarabay	Estudio_Comparativo_de_Tres_Metodologias_para_el_M.pdf	Mexico
https://docplayer.es/35231521-Guia-para-la-evaluacion-de-la-calidad-acuatica-mediante-el-indice-bmwp-bol.html	GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD ACUÁTICA MEDIANTE EL ÍNDICE BMWP/BOL	Unidad de Gestión Ambiental y Calidad del Agua-VRHRy del ULRA de la UMSS		Bolivia
https://www.fbbva.es/wp-content/uploads/2017/05/dat/DE_2009_conceptos_ecologia_fluvial.pdf	CONCEPTOS Y TÉCNICAS EN ECOLOGÍA FLUVIAL	Arturo Elosegí Sergi Sabater	DE_2009_conceptos_ecologia_fluvial.pdf	España

Bibliografía complementaria

General procedure to initialize the cyclic soil water balance by the Thornthwaite and Mather method, Durval Dourado-NetoI; Quirijn de Jong van LierII; Klaas MetselaarIII; Klaus ReichardtIV, *; Donald R. NielsenV. <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-90162010000100013&script=sci-arttext&tlng=ES>

Applied River Morphology. Wildland Hydrology. Pagosa Springs, Colorado. USA, Rosgen, D. 1996.

Bolivia. Decreto Supremo N° 24176 del 8 de diciembre de 1995. Anexo 4, Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica. Disponible en <https://www.lexivox.org/norms/BO-RE-DS24176D.xhtml>

Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas, Ramsar, Irán, 2 de Febrero de 1971.

Elementos de Ecología. Ecología de las Aguas Dulces. *Educación Ambiental en República Dominicana*. Recuperado de <http://www.jmarcano.com/nociones/fresh2.html>

Mena Vásconez, P., A. Castillo, S. Flores, R. Hofstede, C. Josse, S. Lasso, G. Medina, N. Ochoa y D. Ortiz (Eds.). 2011. Páramo. Paisaje estudiado, habitado, manejado e institucionalizado. EcoCiencia/Abya-Yala/ECOBONA. Quito

Metodología para la estimación y evaluación de caudal ambiental en proyectos que requieren licencia ambiental –Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Autoridad Nacional en Licencias Ambientales– Gabriel Pinilla Agudero et al –Bogotá D.C. 2013

Moacyr, S. (s.f.). Unidad 2: Calidad de agua en embalses. Disponible en: https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/75/4/Unidade_2.pdf

Pinilla Agudelo, Gabriel & Rodriguez, Erasmo & Camacho-Botero, Luis. (2014). PROPUESTA METODOLÓGICA PRELIMINAR PARA LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL EN PROYECTOS LICENCIADOS POR EL MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (MADS), COLOMBIA Preliminary Methodological Proposal for Estimating Environmental Flows in Projects Approved by the Ministry of Environment and Sustainable Development (MADS), Colombia. *Acta Biologica Colombiana*. 19. 43-60. <http://www.scielo.org.co/pdf/abc/v19n1/v19n1a5.pdf>

Rocabado G. y Goitia, E (2011). Guía para la evaluación de la calidad acuática mediante el índice BMWP/Bol. Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego, Ministerio de Medio Ambiente y Agua. Bolivia.

Rosero, D. y González, D. (s.f.). Estrategias para la Aplicación del Régimen de Caudales Ecológicos. Disponible en <http://infoagua-guayllabamba.ec/repositorio/web/files/>

Informe Acciones_y_Mecanismos Para Implementación de Estrategias Caudales Ecológicas.pdf

Rosgen, D. 1996. *Applied River Morphology*. Wildland Hydrology. Pagosa Springs, Colorado. USA.

Servicio de Evaluación Ambiental (Ed.) (2016). Guía metodológica para determinar el caudal ambiental para centrales hidroeléctricas en El Seia, Gobierno de Chile. Disponible en http://sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2016/guia_caudal_ambiental.pdf

The Nature Conservancy (2011). Manual del usuario de Indicadores de Alteración Hidrológica, Versión 7.1. Disponible en https://www.conservationgateway.org/Documents/IHAV7-1%20manual%20Spanish_0.pdf

UVA–Universidad de Valladolid, España. 2017. Estudio de Caudal Ecológico Aprovechamientos hidroeléctricos Río Santa Cruz, Argentina. Preparado para UTE Represas Patagonia, Argentina. Disponible en http://www.santacruz.gov.ar/ambiente/audiencia_publica2017/Rio_Santa_Cruz/Estudios%20complementarios/2.%20Caudal%20Ecologico.pdf



Anexo

Planilla de cálculo

Descargar planilla funcional en formato Excel en <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1686>

PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE CAUDALES ECOLÓGICOS

DATOS DEL PROYECTO:		
NOMBRE DEL PROYECTO		XXX
OBJETIVO:		XXX
ALTURA DE LA PRESA (m)		29
VOLUMEN DEL EMBALSE (Hm ³)		50
AREA DE LA CUENCA A APROVECHAR (Km ²)		3500
DATOS BIOTICOS		
1. SOBRE LA IMPORTANCIA BIOLOGICA		
	MARCAR LA OPCION CON X	DESCRIPCION SI CORRESPONDE
A: En el curso existe alguna especie de importancia regional que se encuentre bajo algún estado de protección según listados internacionales (Hábitat poco o nada intervenido)		
B: En el curso existen especies nativas. (Hábitat poco o nada intervenido)		
C. En el curso existen especies nativas e introducidas (Hábitat con alguna intervención, leves alteraciones)		
D. En el curso se encuentran especies menores de bajo interés, por tanto alteraciones en el régimen no generarán impacto (Hábitat poco o nada intervenido con baja riqueza ecológica, hábitat intervenido)	x	
2. SOBRE LOS SERVICIOS AMBIENTALES		
	MARCAR LA OPCION CON X	DESCRIPCION SI CORRESPONDE
A. El recurso alimenta reservorios de agua naturales como páramos o bofedales que mantienen el hábitat y se consideran reservas de aguas (Almacenamiento, recarga de acuíferos, etc.); Mantienen ecosistemas de interés.		
B. Las especies presentes en el ecosistema tienen importancia para preservar el medio y/o son fuente potencial de aprovechamiento (medicinal, económico)		
C. El recurso no se constituye en un elemento de regulación vital (No presta un servicio ambiental saliente).	x	

CALIFICACIÓN 1: IMPORTANCIA DEL PROYECTO RESPECTO AL ENTORNO FÍSICO

MAGNITUD DEL PROYECTO

Volumen del Embalse (Hm ³)	B	1.5 – 60 (Hm ³)
Altura de la Presa (m)	B	12 – 30 (m)
Altura de la Presa (m)	B	12 – 30 (m)

CALIFICACION ENTORNO FISICO B

TAMAÑO DE LA CUENCA

Tamaño de la Cuenca (km ²)	E	Grande
--	---	--------

CALIFICACION TAMAÑO DE LA CUENCA E

Calificación de la importancia del proyecto respecto al entorno físico

CALIFICACION RESPECTO AL ENTORNO FÍSICO Media

CALIFICACIÓN 2: IMPORTANCIA AMBIENTAL

INDICADOR IMPORTANCIA ECOLOGICA

Indicador Importancia Ecológica D

INDICADOR SERVICIOS AMBIENTALES

Indicador Servicios Ambientales C

Calificación de la importancia Ambiental

IMPORTANCIA AMBIENTAL Baja

CALIFICACIÓN 3: ALTERACIÓN DEL SISTEMA HÍDRICO (FÍSICO-BIÓTICO) POR EL PROYECTO

ALTERACIÓN DEL SISTEMA HIDRICO (FISICO - BIOTICO) Media

GRUPO DE METODOS DE CALCULO DE CAUDALES ECOLOGICOS RECOMENDADOS:

Requiere el empleo de métodos hidrobiológicos completos o simplificados o métodos hidráulicos, que consideren los caudales que necesitan las especies indicadoras, en cantidad y calidad, distribuidos en el cauce cumpliendo sus requerimientos de profundidad de agua o perímetro mojado. (Es necesaria la participación de un especialista en biología que defina las especies indicadoras y sus requerimientos, y de un especialista en modelación hidráulica). El énfasis del análisis es cantidad, calidad y régimen del flujo.

