

EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN E. S. P.
Planeación Generación

**METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN
DE LOS CAUDALES DE GARANTÍA AMBIENTAL**



Medellín, Diciembre de 2012

“© Copyright: EE.PP.M. E.S.P. No está permitida su reproducción por ningún medio impreso, fotostático, electrónico o similar, sin la previa autorización escrita del titular de los derechos reservados



EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN E. S. P.
Planeación Generación

**METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN
DE LOS CAUDALES DE GARANTÍA AMBIENTAL**

Por:

Adolfo Grecco Gélvez
Biólogo
Especialista en Medio Ambiente y Geoinformática

Luis Fernando Salazar Velásquez
Ingeniero Civil
Maestría en Recursos Hidráulicos

Diciembre de 2012

“© Copyright: EE.PP.M. E.S.P. No está permitida su reproducción por ningún medio impreso, fotostático, electrónico o similar, sin la previa autorización escrita del titular de los derechos reservados”

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	ANTECEDENTES	2
3.	CONCEPTO DE CAUDAL DE GARANTÍA AMBIENTAL.....	8
4.1	PROPUESTA METODOLÓGICA.....	12
4.1.	PASO 1. DEFINICIÓN DEL CAUDAL DE REFERENCIA.....	12
4.2.	PASO 2. EVALUACIÓN AMBIENTAL MULTIVARIABLE.....	13
4.2.1.	<i>Longitud del Río con drástica reducción de caudal.....</i>	13
4.2.2.	<i>Calidad de agua del río (Índice de calidad IFSN).....</i>	15
4.2.3.	<i>Requerimiento de agua para dilución de carga contaminante que ingresa en el sector afectado (DQO)</i>	17
4.2.4.	<i>Índice de Integridad Biótica de Peces (IIB_{peces}):</i>	18
4.2.5.	<i>Especies acuáticas amenazadas, que migran o se encuentran en peligro de extinción.....</i>	21
4.2.6.	<i>Calidad biológica del agua (Índice de calidad BMWP'/Col)</i>	23
4.2.7.	<i>Índice Biótico de la Vegetación Riparia (IB_{veg Rip}).....</i>	24
4.2.8.	<i>Diversidad del Perifiton.....</i>	27
4.2.9.	<i>Modificación del Paisaje:</i>	30
4.2.10.	<i>Usos del agua en el sector con caudal alterado.....</i>	31
	PASO 3. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DE GARANTÍA AMBIENTAL.....	33
	PASO 4. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO FUTURO DEL CAUCE ALTERADO.....	34
4.	BIBLIOGRAFÍA.....	36

TABLAS

TABLA 1.	CALIFICACIÓN DE LA LONGITUD DEL RÍO CON CAUDALES REDUCIDOS.....	15
TABLA 2.	VARIABLES Y PONDERACIONES DEL IFSN.....	16
TABLA 3.	CLASIFICACIÓN DE CALIDAD DE AGUA SEGÚN EL IFSN.....	16
TABLA 4.	CALIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL IFSN.....	17
TABLA 5.	CALIFICACIÓN DE LA DQO A NIVEL DE AFLUENTES.....	18
TABLA 6.	MÉTRICAS UTILIZADAS EN EL ÍNDICE DE INTEGRIDAD DE PECES.....	19
TABLA 7.	CALIFICACIÓN DE CADA VARIABLE CONSIDERADA.....	20
TABLA 8.	INTERPRETACIÓN DEL PUNTAJE OBTENIDO EN EL IIB DE LOS PECES.....	21
TABLA 9.	CALIFICACIÓN DEL IIB _{PECES}	21
TABLA 10.	CALIFICACIÓN DE ESPECIES QUE MIGRAN ESTÁN AMENAZADA O EN PELIGRO.....	22
TABLA 11.	VALORACIÓN DE LA CALIDAD BIOLÓGICA DEL AGUA SEGÚN EL BMWP'/COL.....	23
TABLA 12.	CALIFICACIÓN DEL BMWP'/COL.....	24
TABLA 13.	PARÁMETROS UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL IIB _{VEGRIP}	25
TABLA 14.	PUNTAJES CONSIDERADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL ÍNDICE.....	26
TABLA 15.	INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ÍNDICE.....	26
TABLA 16.	CALIFICACIÓN DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN RIPARIA.....	27
TABLA 17.	CALIFICACIÓN DE LA DIVERSIDAD DEL PERIFITON.....	29
TABLA 18.	CALIFICACIÓN DEL PAISAJE.....	31
TABLA 19.	CALIFICACIÓN DE LOS USOS DEL AGUA.....	32
TABLA 20.	RESUMEN DEL PASO 2.....	33
TABLA 21.	OBTENCIÓN DEL CAUDAL DE GARANTÍA AMBIENTAL.....	33
TABLA 22.	DETERMINACIÓN DE CAUDALES A SUMINISTRAR POR EL PROYECTO.....	35

FIGURAS

FIGURA 1. CAUDAL ECOLÓGICO NATURAL.....	8
FIGURA 2. CAUDAL ECOLÓGICO IMPUESTO.....	9
FIGURA 3. CAUDAL DE GARANTÍA AMBIENTAL.....	10
FIGURA 4. LONGITUD PROMEDIO DE TÚNELES DE CONDUCCIÓN. ESTUDIO ESEE, 1979..	14

ANEXOS

ANEXO 1. RESUMEN DE LA CALIFICACIÓN AMBIENTAL	38
ANEXO 2. PUNTUACIONES ASIGNADAS A LAS DIFERENTES FAMILIAS DE MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS PARA LA OBTENCIÓN DEL BMWP'/COL .	42



energía | gas natural | aguas

www.epm.com.co

EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN - E.S.P.
ÁREA PLANEACIÓN GENERACIÓN ENERGÍA

Metodología para el cálculo de los caudales de garantía ambiental

VERSIÓN 00

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el creciente requerimiento de recursos naturales para satisfacer las necesidades poblacionales e industriales ha inducido al hombre a utilizar desproporcionadamente algunos de ellos, generando grandes controversias que han despertado la conciencia proteccionista de gobiernos e instituciones comprometidas con el tema.

La producción de energía hidroeléctrica representa una de las actividades que mayor presión realiza sobre los ecosistemas naturales aprovechados para tal fin, principalmente cuando sus diseños incluyen captaciones y conducciones largas o desviaciones totales del flujo normal de una vertiente a otra.

Es fundamental que se legisle al respecto, pero innumerables son los procesos físicos, biológicos y sociales que deben ser abordados cuando se trata el problema. La solución no es sencilla y difícilmente se podrá definir un proceso que contemple la infinidad de variables en cuestión; quizás ésta sea la razón de que aún en aquellos países donde se investiga el tema, continúen legalmente vigentes conjeturas valiosas pero sesgadas a unos pocos elementos de análisis, induciendo reflexión sobre los grandes vacíos que contienen.

En nuestro medio, atreverse a meditar en el problema será sólo el principio de una larga sucesión de intentos que deberán adelantarse para comprenderlo. En este mismo sentido, las notas que aquí se presentan sólo reflejan motivos para el análisis, con la intención de encontrar un mecanismo que permita hacer uso de los recursos naturales sin lesionar drásticamente los ecosistemas de los cuales se derivan. Es de anotar también, que cualquier percepción que se forme en torno al tratamiento de este problema, no será más que, la conjugación de valiosos conceptos técnicos, empíricos y de procedimientos metodológicos que de alguna forma han sido avalados y reconocidos por la comunidad internacional. Esperar obtener la fórmula matemática que defina niveles de compensación aceptables, seguirá siendo el enigma de los estudiosos en la materia.

Luego, el propósito del presente documento, es el de disponer de una base procedimental que normalice y guíe el cálculo de los caudales ambientales en los estudios de aprovechamiento hidroeléctrico, dentro del marco legal y de manejo armónico de los proyectos, con el uso sostenible de los recursos naturales.

2. ANTECEDENTES

Hasta 1972, las diferentes sugerencias sobre la imposición de un caudal ecológico estaban basadas en las conjeturas de biólogos e ingenieros, respaldados por su experiencia profesional y el dogmatismo de sus criterios, más que en una evaluación cuantitativa de las relaciones entre el caudal y la ecología del río.

Muchos estudios se realizaron interpretando fotografías o midiendo el área mojada de la corriente ante diferentes caudales; este tipo de métodos ayudaron a visualizar las discrepancias físicas externas entre diversos caudales, facilitando la evaluación de los aspectos estéticos y recreativos, teniendo en cuenta las variaciones del área húmeda. Sin embargo, esta evaluación no sustituye una cuantificación del agua necesaria para los organismos del medio y para el ambiente que pretende ser preservado.

La incidencia del flujo de agua en los organismos que viven permanentemente o que pasan algunas de sus etapas de metamorfosis en este medio y sus preferencias particulares por velocidades específicas han sido ampliamente ilustradas en la literatura científica. (Fraser, 1972), enumera los siguientes autores y sus trabajos: Ambuhl (1959), quien enfatiza en las adaptaciones de algunas formas de vida a diferentes velocidades de la corriente. Mc. kernon, Johnson y Hoodges (1953), Smoker (1953), Neave (1958) y Wickett (1958), realizaron estudios correlacionando la producción de salmón comercial con las variaciones de caudal de un río a lo largo del año. Los efectos del caudal en la composición y distribución de especies lóxicas fueron notados por (Curtis, 1960), (Dilisle y Wooster, 1964), entre otros. También ha sido descrita la dependencia de varias poblaciones de peces a las fluctuaciones anuales de caudal para el desove (Ever, 1965). Diener (1963), Copeland (1966) y Odun (1970), describieron algunos efectos del caudal en los estuarios y el océano.

Fraser (Ibid), enumeró entre los principales aspectos que son vulnerables a la variación del caudal para algunas especies acuáticas los siguientes: La Migración, pues muchas especies de peces dependen de cambios significativos en los niveles de caudal, que sirven de estímulo para la maduración sexual y posterior migración; la capacidad de levante (desarrollo del embrión y disponibilidad de alimento), ya que los cambios bruscos en el caudal pueden afectar la supervivencia de huevos, los cuales deben estar en aguas bien oxigenadas. De otro lado, el caudal afecta la composición del plancton (los organismos que flotan a merced de la corriente de agua), pues éste se ve afectado por el arrastre que ocasionan las variaciones en el flujo; los

requerimientos espaciales, que en muchos casos están influenciados por la velocidad de la corriente y el espacio disponible, según el volumen de agua; la calidad del agua, que puede verse afectada por la capacidad de dilución de contaminantes asociados al caudal.

(Cuinat, 1981) y Rousel (1981), hicieron mención al caudal de reserva, como el valor de caudal que debe mantener el cauce natural y que no es por lo tanto turbinable; el ministerio de Obras Públicas y Transporte de España (1989), definió como caudal ecológico el mínimo caudal de referencia que debería desaguar la presa para mantener la capacidad biogénica del río, aguas abajo de la misma y a niveles similares a la situación inicial; los franceses utilizaron el término de caudal de garantía biológica, definido como el caudal mínimo, con el cual no hay riesgo ambiental y que garantiza al menos las condiciones de vida existentes (Coupry, 1993); Integral (1994), referencia el término caudal ecológico como el caudal mínimo que permite mantener la vida acuática y la realización de actividades antrópicas que involucran la utilización del recurso agua (agricultura, ganadería, dilución de aguas negras); (Trujillo, 1995), define caudal ecológico, “como el caudal mínimo de referencia que debe conservar un río regulado en su cauce original para mantener la capacidad biogénica a niveles similares a la situación inicial, ya sea aguas abajo de la construcción de una presa o por la desviación de sus aguas a otras zonas de aprovechamiento”.

Para resaltar se tienen los conceptos de (Milhous, 1992), quien sugiere que el criterio más importante para distribuir el agua debe estar en los beneficios que reciba la comunidad. Consecuentemente, las pautas usadas para evaluar las técnicas tendientes a establecer caudales ecológicos sugeridas por el autor son:

- a. Demostrar el beneficio existente que produce el agua reservada como caudal ecológico.
- b. Demostrar que el agua utilizada como caudal ecológico no es un desperdicio.
- c. Demostrar que el caudal ecológico es el mejor uso posible para esa porción de agua.

MEDIDAS ADOPTADAS POR ALGUNOS PAÍSES SOBRE EL CAUDAL ECOLÓGICO:

En Estados Unidos, Trelease (1985), realizó una recopilación de las medidas adoptadas en algunos estados del mismo país, para cumplir con los requerimientos de protección del recurso hídrico; Algunas de las acciones fueron: 1. Adjudicación de caudal: Una porción de caudal de un río es adjudicado para un uso específico de protección de la cuenca a través de una agencia pública; 2. Sistema de reserva de agua: Por la cual se determina un nivel básico de caudal que debe ser respetado; 3.

Derecho de agua: La entidad responsable, mediante un proceso administrativo, determina los caudales apropiados para cada propósito de uso de las aguas de un río; 4. Protección de ríos: Aquellos identificados como patrimonio natural, estético o deportivo, son prohibidos para cualquier tipo de adjudicación; 5. Acción administrativa: La entidad encargada prohíbe temporalmente la utilización de las aguas de un río, para posponer la adjudicación.

Finalmente, en los Estados Unidos, se han desarrollado diversos métodos para estimar los caudales que deben ser descargados a los ríos para conservar el medio natural. Estas estimaciones utilizan desde métodos porcentuales sencillos hasta sofisticadas técnicas de simulación hidráulica como la IFIM (Instream Flow Incremental Methodology, Bovee, 1978), propuesta por el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los EEUU. La aplicación de esta técnica se ha convertido en una exigencia para la obtención y renovación de concesiones en muchos estados norteamericanos.

En Inglaterra, la necesidad de proteger el ecosistema aguas abajo del embalse, condujo al establecimiento de un flujo compensatorio o flujo mínimo. A pesar del empirismo, el principal objetivo inglés fue la conservación del ambiente ribereño, pero con una conciencia más amplia del ecosistema, que no incluyó solo la íctiofauna, sino también la vegetación y otras comunidades acuáticas.

Hoy en Gran Bretaña la asignación de caudales mínimos se realiza teniendo en cuenta las necesidades de las poblaciones piscícolas y la conservación de ecosistemas valiosos. Algunos embalses británicos mantienen una variación estacional en los caudales mínimos y realizan descargas excepcionales en determinados momentos del año para simular las crecidas naturales del río que favorecen las migraciones de salmónidos y mantienen el fondo libre de sedimentos.

La legislación suiza establece unas exigencias mínimas según que las aguas se consideren piscícolas o no; los valores exigidos se calculan en base al caudal alcanzado o excedido durante 347 días al año (Q347), lo que representa el 95% del periodo total anual (365'25 días, teniendo en cuenta la parte proporcional del año bisiesto).

González (1992), en el documento sobre "Evaluación de Impacto Ambiental de Pequeños Proyectos Hidroeléctricos", recopiló información sobre las principales normas que regulan el caudal ecológico en países como España, Irlanda, Grecia, Italia, Escocia y Brasil según como se reporta a continuación:

En España, el decreto 1217/81 expone las condiciones que han de cumplir las minicentrales hidroeléctricas, esto es, tener asignada una potencia nominal inferior a los 5.000 kW, estar sometidas a un caudal ecológico y contar con una escala para peces. Igualmente, la Ley de aguas (2/8/85) impone un caudal ecológico equivalente

a la media del caudal natural cada mes, o a 2 l/s por km² de cuenca hidrográfica; sin embargo, las autoridades locales pueden exigir un caudal de reserva mayor.

En Francia, la Ley 84/512 de junio 29 de 1984 relativa a la pesca en aguas dulces, exige un caudal ecológico del 10% del caudal máximo anual (para los ríos donde el caudal medio anual es menor de 80 m³/s). Para los ríos con caudal superior, el caudal ecológico se ha fijado en un 5% (Artículo 232/6 del Código Rural). Sin embargo, la administración puede suponer un caudal de reserva mayor, si se considera necesario para la protección de los peces.

En Grecia no existe una legislación específica sobre caudal ecológico. Se determina en cada caso según proponga la Administración.

Para los ríos irlandeses se considera que el caudal ecológico a respetar debe representar el 1% del caudal máximo observado en un año. Para los ríos del oeste de Irlanda, el caudal de reserva asciende al 10%. Ello se rige por un procedimiento de las autoridades locales supervisado por la Administración Central.

En Italia no se tiene legislación nacional concerniente al caudal ecológico, pero se presentan reglamentaciones por provincias. En la provincia de Bolzano se exige un caudal ecológico de 2 l/s por km² de cuenca hidrográfica; en Piemonte se exige un caudal ecológico del 10 % del caudal instantáneo, siempre que el caudal natural sea inferior a 120 l/s en el río Anza, 5 l/s en río Rosso y 30 l/s en el río Ollochia.

Actualmente los caudales ambientales son descritos en la legislación nacional italiana en términos generales, como leyes de referencia. Las normas actuales consideran los caudales ambientales como el caudal mínimo a mantenerse aguas abajo de los desvíos de agua. Los Organismos de Cuencas deben establecer reglas específicas para los ríos bajo su responsabilidad, que eventualmente deberán ser reconocidas por las Autoridades Regionales en sus Planes de Protección de los Recursos Hídricos, en los cuales se podrá añadir especificaciones adicionales (ej., diferentes requisitos de caudales mínimos para determinados usos).

En Escocia, el consejo regional determina el caudal ecológico en función de las especies de peces migradoras que existan en el río. Este caudal puede variar entre el 5% y el 25% del caudal máximo anual, aunque el 10% es el habitual. Cuando el caudal natural es utilizado como caudal ecológico, la planta de hidroelectricidad se para.

En Brasil, el caudal ecológico está reglamentado por una norma DNAEE (Departamento Nacional de Aguas y Energía Eléctrica), entidad federal que otorga las concesiones para su uso. Establece que éste no puede ser inferior al 80% del menor valor promedio mensual medido en ese lugar en todo el período de observaciones disponibles. La norma es genérica y tiene como objetivo evitar que

ocurran aguas abajo, condiciones de caudal mínimos peores a los que naturalmente ocurrían sin intervenciones. (Fernández, 1994. Comunicación escrita).

La legislación actual de aguas de Brasil (Ley de Aguas de 1997) establece el dominio público del agua y establece permisos de extracción de agua. Esto obligó a las agencias nacionales y federales a establecer criterios para asignar permisos y para determinar flujos ambientales (Benetti et al. 2002). Los conflictos por usos del agua en Brasil son muy importantes, destacándose la competencia ejercida por el uso de generación de energía por hidroeléctricas y el riego con el resto de los usos. Brasil se ubica en el noveno lugar en cantidad de represas de gran tamaño (Tharme 2003). Por otra parte, si bien este país ocupa los primeros lugares a nivel mundial en disponibilidad de agua su distribución en el territorio es muy heterogénea. Esto ha llevado al país a realizar esfuerzos destacados en su normativa y modificar y crear una compleja institucionalidad, tanto nacional como federal, para poder establecer los permisos de uso del agua (Benetti et al. 2002). Los Estados tienen la libertad de fijar sus propios criterios de caudales ambientales Sin embargo, los criterios se centran en aproximaciones hidrológicas.

En Colombia, la normatividad ambiental no posee ninguna Ley que regule el manejo de aguas en el caso particular del caudal ecológico; sólo el Código Nacional de Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente (Ley 23 de 1973), menciona algunos apartes orientados al buen manejo de las aguas, sin especificar en ningún caso sobre caudales mínimos o máximos para la eventual protección del medio ambiente. La Ley 99 de 1993 establece el requerimiento de Licencia Ambiental expedida por el Ministerio del Medio Ambiente para 13 casos específicos, uno de los cuales es el transvase de caudales de una cuenca a otra, cuando se exceden los 2 m³/s durante los períodos de mínimo caudal.

Posiblemente Colombia sea el país de Sudamérica que más ha avanzado en materia de análisis de metodologías de evaluación de caudales ambientales o al menos ha realizado un importante esfuerzo en hacer disponibles y publicar sus resultados. Se explicita la definición de caudal ecológico como forma de mantener los recursos hidrobiológicos y los ecosistemas asociados (Diez Hernández & Burbano Burbano 2006). Asimismo, presenta ejemplos de estimación de caudales ecológicos en ríos (Diez Hernández & Ruiz Cobo 2007, entre otros). Un informe realizado mediante un convenio entre la Universidad de Colombia y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial realiza un análisis profundo de las metodologías existentes para estimar caudales ambientales, compara sus ventajas y desventajas, establece criterios y lineamientos para una propuesta metodológica de estimación de Caudales Ambientales en Colombia y realiza una propuesta metodológica concreta adaptada a las características colombianas (MAVDT 2008). Este sería el único país sudamericano con una propuesta metodológica propia, que deberá paulatinamente ser adaptada a las necesidades y limitaciones de información nacionales. Dicha propuesta es una modificación de los métodos eco-hidráulicos pero se basa en

 <p>energía gas natural aguas www.epm.com.co</p>	<p>EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN - E.S.P. ÁREA PLANEACIÓN GENERACIÓN ENERGÍA</p>
	<p><i>Metodología para el cálculo de los caudales de garantía ambiental</i></p>
	<p>VERSIÓN 00</p>

índices de integridad biótica y consideran varias comunidades acuáticas como peces, invertebrados, perifíton y vegetación riparia. Asimismo, integra el análisis de la calidad del agua a la metodología. Si bien metodológicamente la propuesta es interesante, es necesario inicialmente validarla, incluir información local para su aplicación, modificarla en algunos puntos que sugieren posibles cambios en los proyectos luego de que entren en operación y adaptarla para que la información necesaria en su aplicación sea la disponible en la etapa de estudio del proyecto. El hecho de utilizar varias comunidades biológicas e integrar calidad de agua implica un avance sustancial en comparación con los métodos clásicos. Por el contrario, la metodología no incluye aspectos socioeconómicos y por tanto no consideran aspectos determinantes para el manejo y futuro de los ecosistemas acuáticos a estudiar.

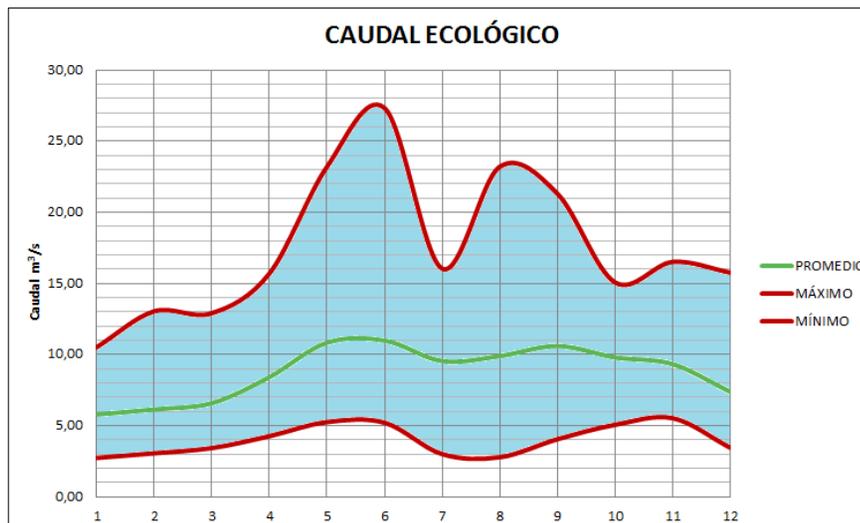
3. CONCEPTO DE CAUDAL DE GARANTÍA AMBIENTAL

El concepto de “Ecología” se define como el conjunto de relaciones que ocurren entre los elementos bióticos y abióticos de un determinado medio; estas relaciones son particulares para cada ecosistema y son el producto de la adaptación y evolución de los individuos en relación con el ambiente que los rodea.

No es adecuado pensar que la asignación de un caudal, cualquiera que éste sea, pueda sustituir, remplazar o mantener sin modificaciones, la bioecología de un medio al cual se le han alterado las condiciones naturales.

Según lo anterior, el concepto de Caudal Ecológico debería definirse como aquellos caudales que permitan la continuidad de la vida acuática y sus relaciones con los elementos bióticos y abióticos del medio, de forma similar, a las que existen normal y naturalmente en el río. Así, en el sentido estricto de las palabras, podría denominarse como "Caudal Ecológico", a la cantidad de agua que corre naturalmente por un cauce, delimitada por los mínimos y máximos caudales históricos instantáneos, con los cuales, toda manifestación de vida de dicha corriente esta permanentemente habituada (Figura 1); es decir, cualquier variación de los flujos naturales de una corriente, ya no podría ser considerada como ecológica, pues ella atentaría contra la bioecología del medio.

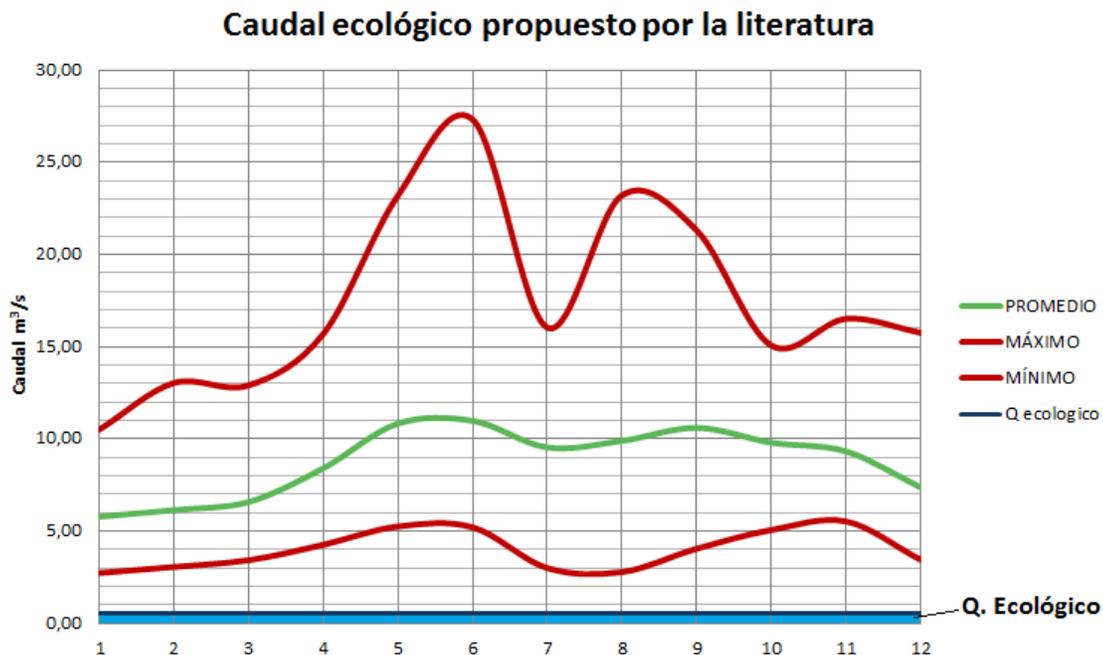
FIGURA 1. CAUDAL ECOLÓGICO NATURAL.



Sin embargo, aunque esta definición es apropiada, crearía una situación tal, que prácticamente sería imposible de cumplir cuando se trata del aprovechamiento de los cursos de agua para diferentes usos; de hecho, significaría el no uso del recurso para cualquier actividad en los períodos de estiaje, en donde los caudales desciendan a niveles cercanos a los mínimos históricos, ya que estos mínimos caudales naturales del río definirían claramente el umbral ecológico mínimo de la corriente, por debajo del cual las condiciones naturales comienzan a variar.

No obstante, hoy en día, y de manera no muy acertada, se pretende por diversas metodologías, calcular un valor en m^3/s , como caudal ecológico, que además de estar por debajo del umbral mínimo, olvida, que dicho valor, estático en el tiempo, no refleja para nada el comportamiento ecológico de ninguna corriente natural de aguas sobre el planeta (Figura 2).

FIGURA 2. CAUDAL ECOLÓGICO IMPUESTO.

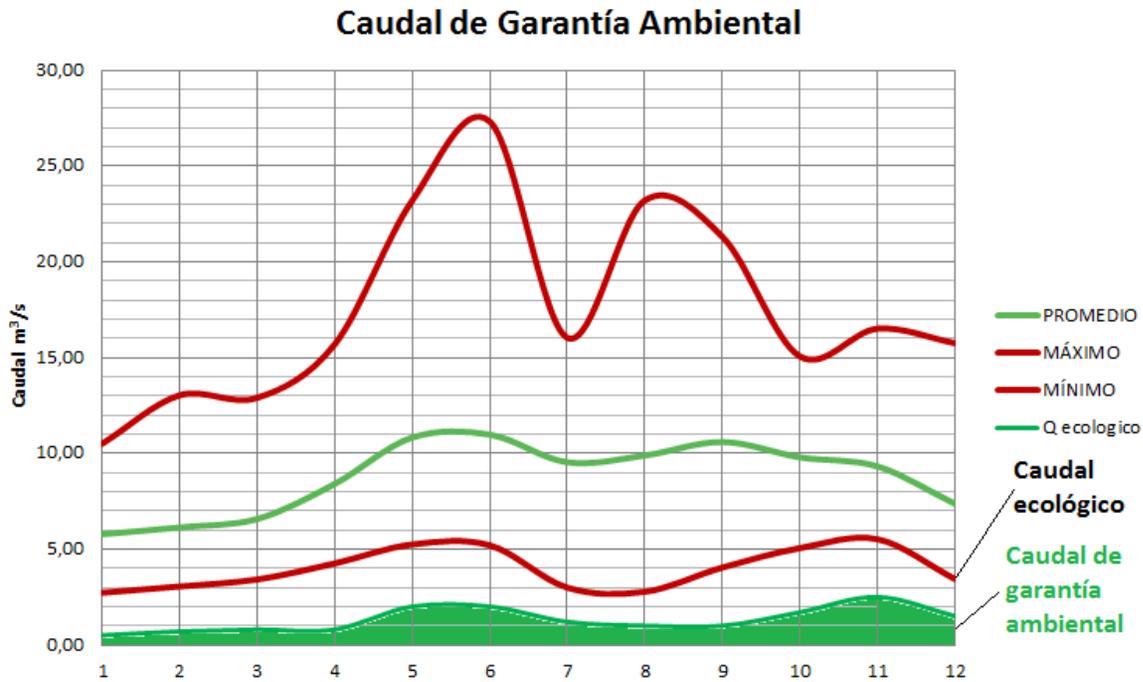


Es evidente entonces que los mal llamados caudales ecológicos, no lo son, pues no reflejan para nada la variabilidad de caudales a lo largo de un periodo climático, además de estar generalmente por abajo del umbral mínimo del caudal ecológico natural en cualquier punto de la corriente.

Por las anteriores razones, se optó por introducir el término “Caudal de Garantía Ambiental (CGA)”, el cual comprende todos aquellos valores mínimos de caudales de un río, calculados para un punto específico de su trayectoria, los cuales reflejan el

límite mínimo que garantiza la continuidad de los principales aspectos físicos, químicos, bióticos, sociales y estéticos existentes en su entorno, aún con el aprovechamiento del recurso para otros usos. De esta manera, la curva resultante, dará continuidad proporcionalmente hablando a los diferentes sucesos bióticos y abióticos que naturalmente ocurren en dicho ecosistema. (Figura 3).

FIGURA 3. CAUDAL DE GARANTÍA AMBIENTAL.



Este término, acuñado inicialmente por los franceses como Debit de Garantie Biologique (Caudal de Garantía Biológica), fue definido como aquellos caudales mínimos con los cuales no hay riesgo ambiental y de los cuales se dirá, que garantizan al menos las condiciones de vida existentes (Coupry, 1993).

En otras palabras, en un ecosistema acuático, preponderadamente lótico, interactúan varios componentes naturales que pueden resultar afectados en menor o mayor grado por variaciones artificiales drásticas de su caudal (no se consideran las variaciones naturales por asumirlas tolerables para un medio homeostático, armónico, dinámico e interactuante con su entorno); tales componentes resultan impactados, tanto por la exagerada sustracción de caudal, como por la descarga desproporcionada de flujo; en ambos casos, deben precisarse los límites garantes

que al menos salvaguarden los principales atributos de la corriente hídrica a intervenir.

En esencia, el caudal de garantía ambiental se fundamentan en la premisa de que todas las relaciones bióticas presentes en una corriente natural de agua, han sido moldeadas a través del tiempo por las diferentes manifestaciones estacionales de los caudales instantáneos mínimos y máximos históricos, series que representan el umbral mínimo y máximo para cada curso de agua. Sin embargo, por fuera de este rango, se puede garantizar la existencia de condiciones medioambientales aún aptas para que continúen desarrollándose algunos procesos físicos, bióticos y sociales que son determinados mediante un análisis multivariable de las principales características de cada corriente.

De la gran cantidad de variables ambientales que posee cada corriente de agua, en principio se han seleccionado las 10 que mayor impacto pueden causar a la ecología de medio, las cuales se pretende mediante la aplicación de la metodología, minimizar; ellas son: largos trayectos de río sin caudal o con caudal drásticamente reducido, calidad fisicoquímica de las aguas propias del río en la zona afectada, presencia de contaminantes en las aguas de los afluentes que ingresan en la zona afectada, presencia de especies ícticas en la zona, especies acuáticas que realizan migraciones, son endémicas, se encuentran amenazadas o en peligro de extinción, Calidad biológica del agua, presencia de vegetación riparia, el perifiton como indicador biológico, análisis del paisaje y los usos del agua en la zona afectada.

Aun cuando el estudio es similar para los casos de adición o sustracción de caudal ocasionado por diversas obras de infraestructura, el presente trabajo se ocupa preferencialmente del análisis de la sustracción ocasionada por la construcción de proyectos hidroeléctricos.

Los impactos que este tipo de obras genera, relacionados con la sustracción de caudal, como la pérdida del hábitat para algunos especímenes biológicos, alteración del régimen fluvial, alteración del paisaje, afectación de los usos del agua, etc., pueden ser abordados mediante el análisis y aplicación de la metodología que a continuación se presenta.

4.1 PROPUESTA METODOLÓGICA

La metodología base utilizada para establecer el Caudal de Garantía Ambiental en la presente propuesta fue la elaborada por EPM. E.S.P. (Grecco, 2005), e incluye algunos parámetros considerados importantes de la metodología UNAL-MADS (2008) y contempla cuatro (4) pasos básicos que se resumen a continuación:

- **Paso 1. DEFINICIÓN DEL CAUDAL DE REFERENCIA:** Conformación de una base de datos con caudales medios diarios naturales, que permita obtener para cada mes del año el Q95% para el sitio de inicio de la alteración en estudio.
- **Paso 2. EVALUACIÓN AMBIENTAL MULTIVARIABLE:** Calificación ambiental del sector del cauce que resultará drásticamente afectado por reducción de caudales.
- **Paso 3. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL A DESCARGAR DESDE EL INICIO DEL CAUCE ALTERADO:** Aplicación del porcentaje obtenido en la calificación ambiental, a la curva de los Q95% mensuales o caudal de referencia calculado en el Paso 1.
- **Paso 4. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO FUTURO DEL CAUCE ALTERADO:** Determinación de los caudales que aportaran los afluentes en el sector del río que resultará drásticamente afectado, mas los calculados en el Paso 3 y los que pueden resultar por vertimientos e infiltraciones de la presa.

A continuación se describe en detalle cada uno de ellos:

- 4.1. **PASO 1. DEFINICIÓN DEL CAUDAL DE REFERENCIA.** Consecución de la serie de caudales que permita la obtención de los caudales naturales: promedio diarios en el sitio de presa o desviación de caudales, con el fin de calcular el Q95% (sobre caudales naturales) para cada mes del año, los cuales serán la referencia para el cálculo del caudal de garantía ambiental. Este valor de referencia es ampliamente utilizado en la literatura.

4.2. **PASO 2. EVALUACIÓN AMBIENTAL MULTIVARIABLE.** Recopilación de información de campo, cuyo objeto será permitir la adecuada calificación de las variables ambientales a garantizar dentro del ecosistema en estudio (cauce con caudal reducido, que por lo general se presenta entre el sitio de presa y la descarga proveniente de la casa de máquinas); en este sentido, se determinarán 10 variables correspondientes tanto a los aspectos físicos, biológicos como sociales, que en conjunto calificarán ambientalmente el sector del cauce alterado; ellas son:

1. Longitud del cauce con caudales drásticamente reducidos.
2. Calidad de agua del río (Índice de calidad IFSN).
3. Requerimiento de agua para dilución de carga contaminante que ingresa en el sector afectado (DQO).
4. Índice de integridad biótica de peces.
5. Especies acuáticas amenazadas, que migran o se encuentran en peligro de extinción.
6. Calidad biológica del agua (Índice de calidad BMWP'/Col).
7. Índice biótico de vegetación riparia
8. Diversidad del perifiton
9. Modificación del paisaje.
10. Usos del agua en el trayecto con caudales reducidos.

4.2.1. Longitud del Río con drástica reducción de caudal:

Esta variable pretende dimensionar la longitud del cauce que sufrirá con mayor severidad la reducción de caudal cuando el proyecto se encuentre en operación; su intención es la de asignar un mayor porcentaje de requerimientos de agua, para aquellos proyectos que presenten trayectos largos de cauce con caudal drásticamente reducido. Para efectos de aplicación de la metodología, se considerará como longitud del río con drástica reducción de caudal, o sector de mayor criticidad, al trayecto comprendido entre el sitio de presa, y aquel punto, en el cual el valor acumulado de caudal medio natural proveniente de los afluentes que ingresan en el sector afectado, sea equivalente al 50 % del valor obtenido para el Q95% correspondiente en el sitio de la captación; de no encontrarse este valor, esta longitud a evaluar equivaldrá a la longitud del sector comprendido entre la presa y la descarga proveniente de la casa de máquinas del proyecto.

Por lo general, la evaluación de este parámetro, requerirá del uso de sistemas de información geográfico (SIG), mediante el cual se deberá delimitar la cuenca aportante únicamente al sector de río que funcionará en el futuro con caudales reducidos (sector comprendido entre la presa del proyecto y el sitio de ubicación de la descarga proveniente de la casa de máquinas); esta información se tabula tanto para la margen izquierda como la derecha del sector afectado, incluyendo el abcisado, el rendimiento y los caudales que ingresan por microcuenca utilizando el

método de regionalización u otro método dependiendo del tipo de información disponible.

Finalmente, con la sumatoria de los caudales que ingresan desde la presa hacia aguas abajo se elabora la curva de acumulación de caudales que ingresan en el trayecto afectado y se procede a determinar la distancia desde la presa hasta el punto donde se alcanza el 50 % del Q95% (calculado para el sitio de presa) para el caso en que los caudales que ingresan sean suficientes para este cálculo; por el contrario, si los caudales que ingresan en el sector no son suficientes para alcanzar el 50 % del Q95%, se establecerá como límite para la medición, el sitio de descarga de la casa de máquinas, en cuyo caso, se medirá la distancia desde la presa hasta la descarga de la casa de máquinas. Este valor del 50% se considera adecuado, ya que implica que en este punto la cuenca ha aportado una cantidad significativa de agua, adicional a lo que se deberá garantizar con los caudales de garantía ambiental. Por ultimo, se califica este parámetro utilizando el ponderador consignado en la Tabla 1.

Para efectos de determinar los rangos sobre los cuales se establecen los ponderadores de la Tabla 1, se procedió a realizar un análisis a nivel nacional, de todos los proyectos hidroeléctricos identificados en el Estudio del Sector de Energía Eléctrica (ESEE, 1979), tomando los 308 proyectos registrados con un potencial de 93.443 MW, de los cuales se utilizó solo aquellos que presentan túnel de conducción (únicos proyectos que generan cauces secos y que por lo tanto requieren caudales de garantía ambiental), encontrando, que la media de las longitudes de los túneles proyectados para estos proyectos, equivale a 6760 metros, según se observa en la siguiente Figura 4.

FIGURA 4. LONGITUD PROMEDIO DE TÚNELES DE CONDUCCIÓN. ESTUDIO ESEE, 1979.

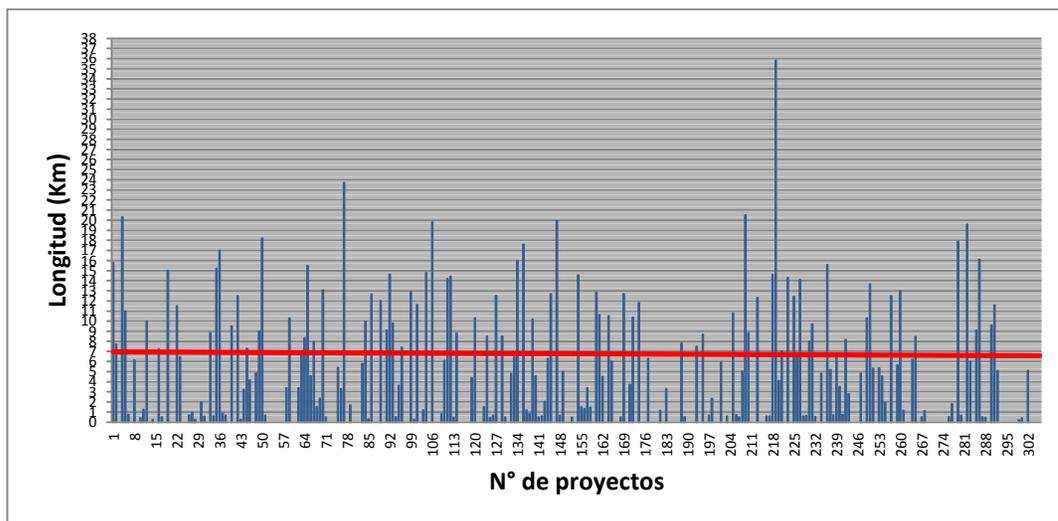


TABLA 1. CALIFICACIÓN DE LA LONGITUD DEL RÍO CON CAUDALES REDUCIDOS.

ASPECTOS AMBIENTALES	METODOLOGÍA	DESCRIPTOR	RANGO (m)		PONDERADOR
Longitud del cauce con caudales drásticamente reducidos	Medición cartográfica hasta el punto donde se alcance por regionalización el 50 % del Q95% medido en el inicio de la perturbación, o en su defecto, hasta el sitio en donde el proyecto retorne las aguas usadas en generación.	km	< 615		0
			1.229	1.844	1
			1.844	2.458	2
			2.458	3.073	3
			3.073	3.687	4
			3.687	4.302	5
			4.302	4.916	6
			4.916	5.531	7
			5.531	6.145	8
			6.145	6.760	9
			> 6760		10

4.2.2. Calidad de agua del río (Índice de calidad IFSN).

Esta variable pretende calificar la calidad fisicoquímica del agua de la corriente afectada, asignando un mayor porcentaje de requerimientos en el caudal de garantía ambiental, para aquellas corrientes que aún conservan sus aguas en condiciones poco alteradas por la intervención humana. Este aspecto es calificado con el índice IFSN; este Índice, desarrollado por la Fundación para la Sanidad Nacional en los Estados Unidos de América (IFSN) se basa en el principio de que la calidad del agua es un atributo independiente del uso para el cual se destina. El índice considera nueve parámetros de evaluación, los cuales presentan un valor de ponderación independiente (Behar **et al**, 1996); (Cardozo **et al**, 1993), de tal forma que es posible comparar la calidad del agua de diferentes sistemas, o bien del mismo sistema en diferentes puntos. Preferiblemente se utilizarán dos puntos de muestreo, uno a la entrada y otro a la salida del futuro trayecto alterado, usando para efectos de la evaluación, el valor medio obtenido.

El índice se desarrolló como producto de la opinión de un conjunto de especialistas a quienes se les solicitó presentar un listado de las principales variables polutantes, el peso que tiene cada variable en la calidad del agua y los rangos de variación de cada una de ellas, explicando su participación en la calidad de agua (en porcentaje) con respecto a ese parámetro. Finalmente se obtuvo un listado de nueve parámetros para el desarrollo del índice, cuyos pesos o ponderaciones se presentan en la Tabla 2:

TABLA 2. VARIABLES Y PONDERACIONES DEL IFSN.

VARIABLE	VALOR RELATIVO (Vi)
Oxígeno disuelto	0,17
Coliformes fecales	0,15
pH	0,12
DBO	0,10
Nitratos	0,10
Fosfatos	0,10
Temperatura	0,10
Turbiedad	0,08
Sólidos totales	0,08
Total	1,00

A partir de los rangos de variación de los diferentes parámetros se elaboraron las respectivas curvas, en las cuales se indica un valor de calidad para cada parámetro (li). Finalmente el IFSN se obtiene mediante la siguiente formulación:

$$IFSN = \sum_{i=1}^9 Vili$$

En donde:

Vi = Peso asignado a cada variable por la metodología.

li = Dato obtenido en las curvas de calibración para cada valor de las variables trabajadas en campo.

Este índice puede presentar resultados entre 0 y 100 puntos dependiendo de la calidad del agua muestreada, cuya clasificación se presenta en la Tabla 3. Por último se califica este parámetro utilizando el ponderador consignado en la Tabla 4.

TABLA 3. CLASIFICACIÓN DE CALIDAD DE AGUA SEGÚN EL IFSN

CALIFICACIÓN	VALOR
Excelente	91 – 100
Buena	71 – 90
Regular	51 – 70
Mala	26 – 50
Pésima	0 – 25

TABLA 4. CALIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL IFSN

ASPECTOS AMBIENTALES	METODOLOGÍA	DESCRIPTOR	RANGO		PONDERADOR
Calidad de agua del río	Índice de calidad IFSN	Excelente	91	100	10
		Buena	86	90	9
			76	80	8
			71	75	7
		Regular	66	70	6
			61	65	5
			56	60	4
			51	55	3
		Mala	26	50	2
Pésima	0	25	1		

4.2.3. Requerimiento de agua para dilución de carga contaminante que ingresa en el sector afectado (DQO):

Esta variable pretende calificar la carga de contaminantes que ingresará al cauce con caudal reducido, proveniente de los afluentes del sector. A mayor carga contaminante, requerirá porcentajes adicionales de caudal de garantía ambiental para mejorar la mezcla y dilución.

La demanda de oxígeno de un agua natural o residual es la cantidad de oxígeno que es consumido por las sustancias contaminantes que están en esa agua durante un cierto tiempo, ya sean orgánicas o inorgánicas. Las técnicas basadas en el consumo de oxígeno son la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda bioquímica del oxígeno (DBO) y el carbono orgánico total (COT o TOC).

La Demanda Química de Oxígeno (DQO), en particular, es la cantidad de oxígeno en mg/l consumido en la oxidación de las sustancias reductoras que están en un agua. Se emplean oxidantes químicos, como el dicromato potásico para determinar su valor. Este parámetro se determina sobre las aguas del afluente principal en el sector afectado, o promediando los resultados a nivel de afluentes principales del sector comprendido entre el sitio de presa y la descarga proveniente de la casa de máquinas, pues es la calidad de sus aguas la que requerirá o no caudal adicional para la dilución de contaminantes. Si en el tramo afectado no se tienen afluentes, se debe medir la demanda química de oxígeno en el tramo alterado. Finalmente se calificará este parámetro, utilizando para ello, el ponderador consignado en la Tabla 5.

TABLA 5. CALIFICACIÓN DE LA DQO A NIVEL DE AFLUENTES

ASPECTOS AMBIENTALES	METODOLOGÍA	DESCRIPTOR	RANGO		PONDERADOR
Requerimiento de agua para dilución de carga contaminante que ingresa en el sector afectado	Determinación de la demanda química de oxígeno DQO	mg/l	0	3	0
			3	6	1
			6	9	2
			9	12	3
			12	15	4
			15	18	5
			18	21	6
			21	24	7
			24	27	8
			27	30	9
			>30		10

4.2.4. Índice de Integridad Biótica de Peces (IIB_{peces}):

Partiendo de la premisa que los peces pueden ser utilizados como un buen indicador del estado de conservación del ecosistema que habitan, pues su abundancia y riqueza de especies esta íntimamente relacionada con el estado de perturbación o degradación a que ha sido sometido un río, se propone este parámetro dentro de la metodología de caudales ambientales, definiéndolo como: “la capacidad de un ecosistema para soportar y mantener una comunidad adaptada, integrada y balanceada de organismos que tienen una composición de especies, diversidad y organización funcional comparable a los hábitats naturales de la región” (Karr, 1981).

El índice de integridad biótica de los peces, es una herramienta metodológica que integra diferentes atributos de las comunidades de peces y provee además una herramienta rápida y de bajo costo relativo para evaluar la salud general de un ecosistema acuático determinado (Velázquez, 2004).

El índice fue propuesto para evaluar los efectos de las actividades humanas sobre los ecosistemas acuáticos, ya que las comunidades biológicas que estos albergan son muy sensibles, de muchas formas, a los cambios en los factores ambientales debido a impactos antropogénicos, y se ha utilizado particularmente para evaluar ambientes loticos dulceacuícolas (Velázquez, 2004). En la siguiente tabla (Tabla 6) se indican los atributos que hacen parte del actual ejercicio de aplicación del IIB para peces.

TABLA 6. MÉTRICAS UTILIZADAS EN EL ÍNDICE DE INTEGRIDAD DE PECES

MÉTRICA	TIPO	DESCRIPCIÓN
Porcentaje de individuos nativos	Estructura de la comunidad	Suma del porcentaje de abundancia de ejemplares de peces nativos. La proporción de individuos de especies nativas decrece con el aumento en el deterioro y la contaminación.
Porcentaje de especies nativas	Estructura de la comunidad	Suma del porcentaje de abundancia de especies nativas. La proporción de especies nativas decrece con el aumento en el deterioro y la contaminación.
Cambio en el porcentaje de especies amenazadas	Estructura de la comunidad	Porcentaje de especies inscritas en alguna de las categorías de conservación del “Libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia”, Mojica J. I., Castellanos C., Usma S. y Álvarez R. (eds), 2002. Un porcentaje alto en este parámetro indica alto grado de intervención humana.
Porcentaje de Individuos Carnívoros	Grupo trófico	Suma del porcentaje de abundancia de individuos que consumen peces. La proporción de individuos carnívoros es menor en ambientes alterados.
Proporción de Individuos con Anormalidades	Condición individual	Suma del porcentaje de abundancia de individuos que presentan anomalías visibles (deformidades, tumores, enfermedades). La proporción de individuos con tales anomalías aumenta cuando la calidad del agua del río (por contaminantes, exceso de nutrientes, exceso de materia orgánica) se reduce
Porcentaje de Individuos Omnívoros	Grupo trófico	Estas especies tiene hábitos alimentarios muy flexibles, consumiendo desde frutos, flores y hojas hasta insectos que caen al agua desde la vegetación marginal, insectos acuáticos y raramente peces pequeños. La proporción de especies omnívoras aumenta con el aumento en el deterioro y la contaminación.
Porcentaje de Individuos Invertívoros	Grupo trófico	Varias especies tienen dietas basadas en invertebrados asociados al sustrato pero en otras predominan invertebrados arrastrados por la corriente y provenientes del medio circundante. La proporción de individuos invertívoros disminuye con el aumento en el deterioro y de la contaminación.
Porcentaje de Individuos Detritívoros	Grupo trófico	Los detritívoros se alimentan de los restos orgánicos depositados en el fondo. El término detritívoros designa pues, a los omnívoros que se nutren de plantas y partículas animales en descomposición. Existen muchos detritívoros entre las especies que pueblan los ríos, donde el alimento escasea. La proporción de individuos detritívoros aumenta con el aumento en el deterioro y de la contaminación.
Índice de diversidad de Shannon – Wiener	Estructura de la comunidad	El índice de Shannon se basa en la teoría de la información y por tanto en la probabilidad de encontrar un determinado individuo en un ecosistema. El valor máximo suele estar cerca

MÉTRICA	TIPO	DESCRIPCIÓN
		de 5, pero hay ecosistemas excepcionalmente ricos que pueden superarlo. A mayor valor del índice indica una mayor biodiversidad del ecosistema y por lo tanto una mayor conservación del ecosistema.

El puntaje de cada variable oscila entre 0,2 y 1 (0,2 para valores que corresponden a sitios donde la variable muestra deterioro y 1 para valores donde la variable muestra sitios de una alta calidad ecológica). El índice de integridad biótica es la suma de los puntajes de cada variable, dividida por el número de variables. El índice total fluctúa entre 0,2 y 1 (Camacho, 2008). Las siglas IN, EN, IO, etc., que se utilizan en la siguiente ecuación corresponden a las variables de la Tabla 7.

$$IIB_{Peces} = [Puntaje IN + Puntaje EN + Puntaje IO + Puntaje II + Puntaje IC + Puntaje ID + Puntaje IA + Puntaje SW + Puntaje EA]/9$$

De acuerdo con el puntaje obtenido con el IIB_{Peces} , la integridad biótica se podrá clasificar de la manera descrita en la Tabla 8.

TABLA 7. CALIFICACIÓN DE CADA VARIABLE CONSIDERADA

Métrica	Puntaje		
	0,2	0,6	1
Porcentaje de Individuos Nativos (IN)	< 33%	33 – 67 %	> 67 %
Porcentaje de Especies Nativas (EN)	< 33 %	33 – 67 %	> 67 %
Porcentajes de especies amenazadas (EA)	< 10 %	10 – 30 %	> 30 %
Porcentaje de individuos carnívoros (IC)	< 1 %	1 – 5 %	> 5 %
Proporción de Individuos con Anormalidades (IA)	> 5 %	1 – 5 %	< 1 %
Porcentaje de Individuos Omnívoros (IO)	> 45 %	10 – 45 %	< 10 %
Porcentaje de Individuos invertívoros (II)	< 25 %	25 – 80 %	> 80 %
Porcentaje de individuos detritívoros (ID)	> 50 %	10 – 50 %	< 10 %
Diversidad de SHANNON - WIENER (SW)	< 1.5	1.5 - 2.5	> 2.5

TABLA 8. INTERPRETACIÓN DEL PUNTAJE OBTENIDO EN EL IIB DE LOS PECES

PUNTAJE DEL IIB _{PECES}	INTERPRETACIÓN	IMPLICACIONES ECOLÓGICAS
0 - 0,3	Baja integridad biótica de los peces	Estado ecológico deficiente o malo para esta comunidad
0,31 - 0,6	Moderada integridad de los peces	Estado ecológico moderado para esta comunidad
0,61 – 1	Alta integridad biótica de los peces	Estado ecológico bueno o excelente para esta comunidad

La evaluación se realizará a lo largo de todo el trayecto que sufrirá la reducción de caudales y los resultados de calificarán según el ponderador consignado en la Tabla 9.

TABLA 9. CALIFICACIÓN DEL IIB_{peces}

ASPECTOS AMBIENTALES	METODOLOGÍA	DESCRIPTOR		RANGO	PONDERADOR	
Índice de Integridad biótica de peces	El índice de integridad biótica es la suma de los puntajes de cada variable, dividida por el número de variables. El índice total fluctúa entre 0,2 y 1	0 - 0,3	Baja integridad biótica de los peces	0,00		0
				0,01	0,10	1
				0,11	0,20	2
				0,21	0,30	3
		0,31 - 0,6	Moderada integridad de los peces	0,31	0,40	4
				0,41	0,50	5
				0,51	0,60	6
		0,61 – 1	Alta integridad biótica de los peces	0,61	0,70	7
				0,71	0,80	8
				0,81	0,90	9
			> 0,9	10		

4.2.5. Especies acuáticas amenazadas, que migran o se encuentran en peligro de extinción:

Esta variable determina la presencia o ausencia de especies de organismos acuáticos amenazados o en peligro de extinción. El hecho de identificar al menos una especie amenazada, que realice migraciones o se encuentre en peligro de extinción, calificará

esta variable con el mayor puntaje posible de asignar y por lo tanto con un porcentaje de caudal en calidad de Garantía Ambiental equivalente a dicho puntaje.

Es importante anotar que la diversidad y abundancia de la comunidad de peces presente en un sistema depende de muchos factores, entre los cuales cabe anotar la oferta alimentaria y de nicho, los aspectos topográficos (altitud, pendiente) hidrológicos (régimen anual, velocidad del agua, pendiente del cauce) y antrópicos (actividad pesquera, disposición de residuos), entre otros. Estas características particulares, propias de cada cuenca, influyen sobre la composición, dinámica y topes migracionales de sus comunidades de peces. Así pues, las partes altas de las cuencas hidrográficas, dadas las condiciones pulsantes, mantienen una comunidad íctica con un número reducido de especies, cuya frecuencia y abundancia es baja, dado que la oferta de hábitat, de alimento y de nicho no es muy amplia.

Cuando se habla de movimientos de la comunidad de peces se deben mencionar dos tipos: 1). movimientos longitudinales río arriba y río abajo, en donde las distancias recorridas por los individuos son considerables; y 2). movimientos laterales (tributarios - cauce principal - tributarios), donde las distancias recorridas son mucho menores.

Para el caso de encontrar especies que realicen migraciones longitudinales se deberá evaluar la importancia biológica y económica de dichos eventos, de donde podría desprenderse la necesidad de estudiar en diferentes puntos del trayecto alterado, el ancho y profundidad mínima del cuerpo de agua, determinando el caudal requerido que garantice el proceso migratorio en las épocas del año respectivas. Pero no se trata solo de peces, sino de especies faunísticas que hagan uso del recurso agua, por lo que esta evaluación deberá involucrar diferentes grupos taxonómicos, incluidos anfibios, mamíferos, reptiles, etc., principalmente aquellos con movilidad reducida, con acceso al trayecto que será alterado. Esta información debe corroborarse en la lista de la Unión Mundial para la Naturaleza (IUCN), Libro Rojo, que presenta la información para Colombia. Finalmente este parámetro se califica utilizando para ello el ponderador respectivo que aparece en la Tabla 10.

TABLA 10. CALIFICACIÓN DE ESPECIES QUE MIGRAN ESTÁN AMENAZADA O EN PELIGRO.

ASPECTOS AMBIENTALES	DESCRIPTOR	PONDERADOR
Especies acuáticas que realizan migraciones, son endémicas, amenazadas o se encuentran en peligro de extinción	Especies con amplia distribución	0
	Especies amenazadas o en peligro de extinción	10

4.2.6. Calidad biológica del agua (Índice de calidad BMWP'/Col):

Esta variable pretende calificar la calidad del agua en función de la presencia de macroinvertebrados acuáticos, asignando un mayor valor a aquellos organismos indicadores de aguas de buena calidad. Un valor alto del índice implica un mayor porcentaje en el agua que se debe destinar para cubrir los requerimientos de caudal de garantía ambiental. Se considera que un medio acuático presenta una buena calidad biológica cuando tiene unas características naturales que permiten que en su seno se desarrollen las comunidades de organismos que le son propios.

La Evaluación Biológica de la Calidad de las Aguas se logra con el índice BMWP', (*Biological Monitoring Working Party Score System*) (Ver anexo 2), el cual se basa en la existencia de una comunidad de macroinvertebrados que actúa como censor ambiental; para ello, se ha de asegurar un muestreo representativo de la misma, que incluya a representantes de las familias que habitan en el punto a estudiar, realizando muestreos de tipo cualitativo con las redes en todos los microhábitats existentes en la zona: orillas con o sin vegetación, zonas de piedras, de arenas, en corriente y sin ella, etc. El muestreo se dará por terminado cuando nuevas redadas no aporten capturas de representantes de nuevas familias de macroinvertebrados. La duración de esta operación depende de la experiencia y habilidad del operador.

El uso del índice BMWP', requiere identificar los macroinvertebrados a nivel de familia, lo que representa un considerable ahorro de trabajo taxonómico, y la posibilidad de ser utilizado por personal sin gran experiencia taxonómica. Tras la identificación de los macroinvertebrados, se elabora una lista de inventario con las familias presentes (Ver Tabla 11). Se busca la puntuación que cada familia tiene (Ver Anexo 2), y se obtiene el valor del índice BMWP' por la suma total de la puntuación correspondiente a cada una de ellas.

TABLA 11. VALORACIÓN DE LA CALIDAD BIOLÓGICA DEL AGUA SEGÚN EL BMWP'/COL

CLASE	CALIDAD	VALOR	SIGNIFICADO	COLOR
I	"Buena"	>150	Aguas muy limpias	Azul
		101 – 120	Aguas no contaminadas o no alteradas de modo sensible	
II	"Aceptable"	61 – 100	Son evidentes algunos efectos de contaminación	Verde
III	"Dudosa"	36 – 60	Aguas contaminadas	Amarillo
IV	"Crítica"	16 – 35	Aguas muy contaminadas	Naranja
V	"Muy crítica"	<15	Aguas fuertemente contaminadas	Rojo

Finalmente, los resultados del BMWP'/Col son calificados mediante el ponderador respectivo que aparece en la Tabla 12.

TABLA 12. CALIFICACIÓN DEL BMWP'/Col

ASPECTOS AMBIENTALES	METODOLOGÍA	DESCRIPTOR	RANGO		PONDERADOR
Calidad biológica del agua	Valor del índice BMWP' Col	Muy crítica	<16		0
		Crítica	16	35	1
		Dudosa	36	60	2
		Aceptable	61	70	3
			71	80	4
			81	90	5
			91	100	6
		Buena	101	110	7
			111	120	8
		Muy buena	121	130	9
			>130		10

4.2.7. Índice Biótico de la Vegetación Riparia (IB_{veg Rip}):

La vegetación riparia es la típica de las riberas de ríos y arroyos, la cual se ubica a lo largo de los cursos de agua; esta vegetación da lugar a formaciones lineales de interés paisajístico y climático. Transversalmente se distinguen zonas de vegetación que van desde las plantas parcialmente sumergidas, hasta las formaciones arbóreas y arbustivas del bosque en galería.

La vegetación de ribera es un componente clave de los ecosistemas fluviales que proporciona una gran cantidad de servicios ecosistémicos. Por un lado, estas formaciones vegetales regulan los flujos de materia y energía en los ecosistemas acuáticos y terrestres, aportando materia orgánica particulada al cauce (hojarasca, ramas, frutos, etc.), una de las principales fuentes alimenticias para los organismos que habitan en los cauces fluviales (microorganismos, invertebrados) (Naiman *et al.*, 1993; (Bodie, 2000). Además, los bosques riparios influyen de forma decisiva en la morfología y procesos geomorfológicos que tienen lugar en el territorio fluvial.

El desarrollo de la vegetación de ribera ayuda a la estabilización de sedimentos asociados a las orillas y llanuras de inundación, evita la erosión de las márgenes y suministra elementos, tales como ramas caídas, troncos muertos y raíces, que favorecen la retención de sedimentos y la creación de nuevos hábitats (Gregory, 2003). Las formaciones vegetales riparias tienen, igualmente, una importante función de filtro que ayuda a mejorar la calidad del agua, ya que su capacidad de retención

evita la llegada a las aguas de contaminantes y exceso de nutrientes por escorrentía o de forma subsuperficial.

Por otra parte, factores como el grado de cubierta vegetal de la zona riparia juegan un papel fundamental en la regulación de la transferencia de energía térmica que llega a los cauces de los ríos. En zonas ribereñas con poca cubierta vegetal se producen grandes fluctuaciones en la temperatura del agua a lo largo del año y dentro de un mismo día (Quinn, 1992). La temperatura ambiental controla el metabolismo basal de los animales poiquiloterms como los peces, influyendo en aspectos como el ritmo de crecimiento, la reproducción y en último término el tamaño poblacional (Jobling, 1995).

En la Tabla 13 se incluyen los atributos o variables que se escogieron para la construcción del IIB de la vegetación riparia; en la Tabla 14, se presentan los puntajes considerados en la evaluación de dichos indicadores y en la Tabla 15, la interpretación del resultado final del índice.

TABLA 13. PARÁMETROS UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL IIB_{VegRip}

MÉTRICA	TIPO	DESCRIPCIÓN
Especies riparias (EP)	Estructura de la comunidad	Número de especies riparias (plantas no acuáticas que requieren agua freática para su desarrollo; plantas freatófitas). Aumenta el número en sitios conservados.
Especies acuáticas (EQ)	Estructura de la comunidad	Número de especies acuáticas (plantas que crecen en el agua o en suelos saturados). Aumenta el número en sitios conservados.
% Especies anuales (EA)	Estructura de la comunidad	Suma de la cobertura relativa de las plantas anuales. A mayor deterioro, mayor cantidad de estos taxones no perennes.
% Especies exóticas (EE)	Estructura de la comunidad	Suma de la cobertura relativa de las plantas no nativas. A mayor deterioro, mayor cantidad de estos taxones foráneos.
% Especies ruderales (ER)	Estructura de la comunidad	Suma de la cobertura relativa de las plantas que colonizan ambientes disturbados. A mayor deterioro, mayor cantidad de estos taxones resistentes a la alteración.
% Especies sensitivas (ES)	Estructura de la comunidad	Suma de la cobertura relativa de las plantas sensibles al disturbio. Se asume que estas especies sensibles son de distribución restringida y que su cobertura se reduce en ambientes disturbados.
% Especies tolerantes (ET)	Estructura de la comunidad	Suma de la cobertura relativa de las plantas tolerantes al disturbio. Se asume que estas especies son de amplia distribución y que su cobertura se incrementa en ambientes alterados.
Biomasa (B)	Proceso biológico	Cantidad promedio de gramos de materia orgánica seca por metro cuadrado de área en los transectos muestreados en la zona riparia. Esta biomasa se incrementa a medida que el sitio está más alterado, pero se reduce en casos de deterioro extremo.

El puntaje de cada variable (Tabla 14) oscila entre 0,2 y 1 (0,2 para valores que corresponden a sitios donde la variable muestra deterioro y 1 para valores donde la variable muestra sitios de una alta calidad ecológica). El índice de integridad biótica es la suma de los puntajes de cada variable, dividida por el número de variables. El índice total fluctúa entre 0,2 y 1 (Camacho, 2008). Las siglas EP, EQ, EA, etc., que se utilizan en la siguiente ecuación corresponden a las variables de la Tabla 13.

$$IIB_{VegRip} = [Puntaje EP + Puntaje EQ + Puntaje EA + Puntaje EE + Puntaje ER + Puntaje ES + Puntaje ET + Puntaje B]/8$$

De acuerdo con el puntaje obtenido con el IIB_{VegRip} , la integridad biótica se podrá clasificar de la manera descrita en la Tabla 15.

TABLA 14. PUNTAJES CONSIDERADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL ÍNDICE

Métrica	Puntaje 0	Puntaje 0,3	Puntaje 0,7	Puntaje 1
Nº de Especies riparias (EP)	0–5	6–15	16-30	>30
Nº de Especies acuáticas (EQ)	0–1	2–3	4–5	>5
% Especies anuales (EA)	>15%	12–15%	8-11%	<8%
% Especies exóticas (EE)	>10%	8-10%	5–7%	<5%
% Especies ruderales (ER)	>15%	12–15%	8-11%	<8%
% Especies sensitivas (ES)	<2%	3–10%	11-20%	>20%
% Especies tolerantes (ET)	>60%	40–60%	20–39%	<20%
Biomasa gr/m ² (B)	>801 o <100	451–800	201–450	100–200

TABLA 15. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ÍNDICE.

Puntaje del IIB_{VegRip}	Interpretación	Implicaciones Ecológicas
0 - 0,3	Baja integridad biótica de la vegetación riparia	Estado ecológico deficiente o malo para esta comunidad
0,31 - 0,6	Moderada integridad biótica de la vegetación riparia	Estado ecológico moderado para esta comunidad
0,61 - 1	Alta integridad biótica de la vegetación riparia	Estado ecológico bueno o excelente para esta comunidad

Finalmente, los resultados del índice se califican mediante la utilización de los ponderadores respectivos que aparecen en la Tabla 16.

TABLA 16. CALIFICACIÓN DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN RIPARIA

ASPECTOS AMBIENTALES	METODOLOGÍA	DESCRIPTOR	RANGO	PONDERADOR
ÍNDICE BIÓTICO DE VEGETACIÓN RIPARIA	El índice oscila entre 0 y 1; cero para los sitios donde la variable demuestra deterioro y uno para sitio sin alteración	Estado ecológico deficiente o malo para esta comunidad	< 0,01	0
			0,01 0,10	1
			0,11 0,20	2
			0,21 0,30	3
		Estado ecológico moderado para esta comunidad	0,31 0,40	4
			0,41 0,50	5
			0,51 0,60	6
			0,61 0,70	7
			0,71 0,80	8
			0,81 0,90	9
Estado ecológico bueno o excelente para esta comunidad	> 0,9	10		

4.2.8. Diversidad del Perifiton:

Las algas del perifiton constituyen una comunidad adherida a diferentes sustratos en un río (Allan, 1995) y son los productores primarios de la red trófica (Wetzel, 2001). La colonización, el crecimiento y el desarrollo de esta comunidad comienza con especies pioneras, de vida corta y tasas reproductivas altas, que preparan el ambiente para la llegada de especies intermedias y termina con la entrada de especies tardías de ciclos de vida más complejos y tasas reproductivas más lentas (Stevenson, 1996).

Las algas bentónicas (es decir, las que crecen asociadas a un sustrato en el fondo de los ecosistemas acuáticos), son organismos fotosintéticos que, a pesar de su pequeño tamaño, son los principales responsables de la síntesis de materia orgánica en los ríos. Este grupo engloba a una gran diversidad de especies pertenecientes a distintos grupos taxonómicos, cuyo tamaño oscila entre menos de 2 micrómetros, hasta colonias filamentosas de varios centímetros de longitud.

En todo caso, para su identificación se precisa su observación al microscopio. Pueden desarrollarse sobre las piedras, sobre restos de madera, sobre la vegetación (ej.: carrizos, eneas, juncos) y sobre el sedimento fino (arenas, limos y arcillas).

La calidad del agua es una de las variables que influyen en la mayor o menor diversidad del perifiton de los ríos, pero no es la única. La heterogeneidad espacial en cada tramo, en lo que se refiere a diferencias de velocidad, tipo de sustrato, existencia o no de vegetación, el deterioro de la cuenca por contaminación antrópica,

la sustracción o adición exagerada de caudales, etc., determinan la mayor o menor riqueza de esta comunidad.

Las variaciones, tanto estacionales como anuales, de las condiciones ambientales determinan fluctuaciones en las poblaciones de estas algas, cuyo desarrollo depende de la temperatura, la intensidad luminosa, las características hidrodinámicas y las características fisicoquímicas de las aguas. Cada tramo de río, según sus condiciones naturales, tiene una flora algal determinada. Cualquier tipo de perturbación, como el constituido por contaminaciones de diverso tipo, lleva a un cambio en esta composición que, en general, se traduce en la desaparición de muchas de las especies propias, que son sustituidas por especies mucho más tolerantes. A partir de la composición de la comunidad del perifiton se pueden calcular índices bióticos que informan indirectamente sobre la calidad del ecosistema.

Si la contaminación es tóxica además hay un descenso en la producción primaria. Por el contrario, si la contaminación es orgánica o por los abonos de la agricultura, la producción aumenta. Por lo tanto, los desplazamientos de la biomasa por encima o por debajo de lo que hay en condiciones naturales, también puede ser un indicador de la calidad del agua.

Los índices de diversidad son expresiones matemáticas que usan tres componentes de la estructura de la comunidad: riqueza (número de especies presentes), equitatividad (uniformidad en la distribución de los individuos entre las especies) y abundancia (número total de organismos presentes), para describir la respuesta de una comunidad a la calidad de su ambiente.

El índice de Shannon se basa en la teoría de la información y por tanto en la probabilidad de encontrar un determinado individuo en un ecosistema. Se calcula de la siguiente forma:

$$H = - \sum_{i=1}^s p_i \bullet \log_2(p_i)$$

Donde:

$$p_i = \frac{n_i}{N}$$

n_i = número de individuos en el sistema de la especie determinada i

N = número total de individuos

S = número total de especies

El valor máximo suele estar cerca de 5, pero hay ecosistemas excepcionalmente ricos que pueden superarlo. A mayor valor del índice indica una mayor biodiversidad del ecosistema. Valores por encima de 3 son típicamente interpretados como "diversos". Valores inferiores a 2,4 - 2,5 indican que el sistema está sometido a tensión (vertidos, dragados, canalizaciones, regulación por embalses, etc.). Es un índice que disminuye mucho en aguas muy contaminadas. Por tanto, cuanto mayor valor tome el índice de Shannon-Wiener, mejor calidad biológica tendrá el agua objeto de estudio.

La suposición del planteamiento de la diversidad es que los ambientes no alterados se caracterizan por tener una alta diversidad o riqueza, una distribución uniforme de individuos entre las especies y una moderada a alta cantidad de individuos. En ambientes contaminados con desechos orgánicos degradables, la comunidad generalmente responde con un descenso de la diversidad con pérdida de organismos sensibles, aumento en la abundancia de los organismos tolerantes las cuales ahora tienen una fuente enriquecida de alimentos, y por supuesto un descenso de la equitatividad.

En contraste, la respuesta a tóxicos no degradables o polución ácida, se traduce en un descenso tanto de la diversidad como de la abundancia así como en la eliminación de organismos sensibles, además que no hay fuentes adicionales de alimento para las formas tolerantes.

Para efectos de aplicación metodológica, este parámetro se calificará según aparece en la Tabla 17.

TABLA 17. CALIFICACIÓN DE LA DIVERSIDAD DEL PERIFITON

ASPECTOS AMBIENTALES	METODOLOGÍA	DESCRIPTOR	RANGO	PONDERADOR	
Calidad del agua por Diversidad del Perifiton según índice de SHANNON - WIENER	El índice es atractivo por su fácil aplicación y su independencia del tamaño de la muestra, arrojando valores que van desde 0 hasta 5, donde 5 puede llegar a ser la máxima diversidad	Aguas muy contaminadas	0,00	0,30	1
			0,30	0,60	2
			0,60	0,90	3
		Aguas medianamente contaminadas	0,90	1,20	4
			1,20	1,50	5
			1,50	1,80	6
			1,80	2,10	7
			2,10	2,40	8
			2,40	2,70	9
		Aguas muy limpias	> 2.7	10	

4.2.9. Modificación del Paisaje:

Esta variable pretende identificar los diferentes puntos transitados por personas (vías, núcleos poblados, etc.), desde los cuales se pueda tener visibilidad sobre el sector del río que sufrirá la reducción de caudal. Supone que a mayor longitud de cauce observable, mayor es la calificación que recibe y por lo tanto, mayor el porcentaje de caudal de Garantía Ambiental que requerirá.

Para su estudio y por facilidad metodológica, se utilizan las técnicas correspondientes a los valores escénicos y emocionales del medio natural; en este sentido, las consideraciones que se hacen del paisaje se abordan a través de sus cualidades principales de visibilidad, fragilidad y calidad. Estos conceptos corresponden a tres enfoques o líneas de trabajo mediante las cuales es posible asumir su estudio. Es evidente que no es necesario que ellas sean utilizadas en conjunto cuando se hace un análisis, ya que todo dependerá de los aspectos relevantes del paisaje que sean de interés, y por ello, el tema se abordará sólo desde el punto de vista de la visibilidad o cuenca visual sobre el cauce con caudal reducido, por considerar que este paisaje es poco agradable a la percepción de la mayoría de las personas.

La mayoría de los enfoques aplicados al análisis visual del paisaje conceden gran importancia a la determinación de las áreas de visibilidad desde distintos puntos. Esto implica que se defina la superficie desde donde se observa el punto o la secuencia de puntos analizados o, bien, el horizonte observable desde el lugar mismo. Para ello existen métodos manuales que producen mapas de visibilidad por medios de esquemas de campo; sin embargo, este análisis sólo ha podido enfocarse de forma sistemática y con mayor rigor en los últimos años con la aplicación del microcomputador y los sistemas de información geográfica.

La cuenca visual engloba a todos los posibles puntos de observación desde donde la acción es visible. Su determinación delimita el ámbito de los posibles impactos visuales que se causan y que puedan alterar las vistas de todos esos puntos de observación con un nuevo elemento artificial al modificar las condiciones del territorio.

Para efectos de la aplicación de la metodología, se considerarán tantos puntos u observadores, como sea necesario ubicar en las diferentes coordenadas geográficas de ubicación de la infraestructura existente en el área de influencia del proyecto, incluyendo viviendas, edificaciones de otro tipo, vías, etc. Esta información cartográfica es posible de obtener, en las corporaciones ambientales regionales o en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Posteriormente se continúa con la utilización de software especializado como el Arc View, etc., y de herramientas que involucran el análisis espacial de superficies y evaluaciones como Viewshed, etc., hasta obtener el mapa del trayecto de río que tendrá caudales reducidos y que será

visible desde los puntos marcados con observadores desde el comienzo de la evaluación. Finalmente se realiza la medición de la longitud de cauce que será visible y se califica según se presenta en la Tabla 18.

TABLA 18. CALIFICACIÓN DEL PAISAJE.

ASPECTOS AMBIENTALES	METODOLOGÍA	DESCRIPTOR	RANGO		PONDERADOR
Modificación del paisaje	Cuenca visual (Sumatoria de longitudes en metros del cauce con caudales reducidos que se observa desde los diferentes puntos de la cuenca, principalmente desde la infraestructura existente en la zona, viviendas, vías, etc.)	Ausente	< 1		0
		Para el caso de presentarse escenarios naturales únicos o especiales, se le asignará automáticamente la máxima calificación destinada a este parámetro	1	1000	1
			1000	2000	2
			2000	3000	3
			3000	4000	4
			4000	5000	5
			5000	6000	6
			6000	7000	7
			7000	8000	8
			8000	9000	9
> 9000		10			

4.2.10. Usos del agua en el sector con caudal alterado:

Esta variable pretende proteger y calificar los usos del agua que se encuentren instalados en el sector del río que será afectado con la reducción de caudal. De identificarse usos para actividades agrícolas, pecuarias, consumo humano, o cualquier otro uso, se asigna la calificación de acuerdo con el porcentaje resultante entre la sumatoria de caudal requerido (usos totales instalados o proyectados en el sector de río drásticamente alterado) y el promedio anual del Q95% en el sitio de inicio de la perturbación; en otras palabras, a mayores usos, mayores exigencias. Es importante aclarar que este requerimiento de agua obtenido con esta calificación es adicional al que obligatoriamente se deberá dejar por ser caudales concesionados en el tramo alterado.

Para efectos de calificar este parámetro se consultarán y tabularán los registros que sobre usos y usuarios del agua poseen las respectivas corporaciones regionales con jurisdicción en el área de influencia del proyecto; una vez tabulada y contabilizada la información sobre usos se procese a realizar la calificación según la información que se presenta en la Tabla 19.

TABLA 19. CALIFICACIÓN DE LOS USOS DEL AGUA.

ASPECTOS AMBIENTALES	METODOLOGÍA	DESCRIPTOR	RANGO		PONDERADOR
Usos del agua en el trayecto con caudales reducidos	Porcentaje de caudal concesionado o proyectado para uso futuro, en relación con el Q95% promedio anual determinado para el sitio de inicio de la perturbación. (El caudal del usos además de lo anterior, se suma en su totalidad al caudal ambiental)	Ausente	0,000		0
		Presente	0,000	0,001	1
			0,001	0,002	2
			0,002	0,003	3
			0,003	0,004	4
			0,004	0,005	5
			0,005	0,006	6
			0,006	0,007	7
			0,007	0,008	8
			0,008	0,009	9
> 0,009		10			

La parte final del PASO 2, involucra el procesamiento de los resultados obtenidos en la investigación realizada, los cuales deben ser tabulados y codificados según el componente ambiental al que pertenezcan; se continúa con el análisis referido a la calificación que mejor los define, concluyendo con la obtención de una calificación ambiental del tramo afectado, que en su conjunto evalúa las principales características del medio en cuestión y determina en última instancia los porcentajes periódicos de caudal requerido en el trayecto afectado por la sustracción (Ver anexo 1 de este documento).

En resumen, La metodología determina que la calificación ambiental del sector del río que sufrirá la reducción de caudal se realiza mediante la evaluación de 10 variables, cada una con un peso del 10 %, pero el investigador podrá variar esta ponderación de encontrar aspectos relevantes de mayor valor o que deban ser protegidos bajo circunstancias especiales; en todo caso, la suma de todas las variables estudiadas siempre equivaldrá al 100 % de los requerimientos.

Para un caso hipotético en que estas 10 variables reciban la máxima calificación, el total sumaría 100 puntos, los cuales corresponderían al 100 % de la curva del caudal calculado para el Q95%, es decir, no se podría realizar sustracciones de caudal natural por debajo de dicha curva, dadas las condiciones ambientales de tal corriente de agua. Adicionalmente, para el caso de detectarse especies amenazadas o en peligro de extinción o especies que realizan importantes migraciones longitudinales, se realizará el cálculo considerando secciones transversales y profundidad de la lámina de agua según sea la especie que se quiere proteger, más la adición de los

otros requerimientos si éstos se presentan. Al final del proceso se tendría una tabla como la siguiente:

TABLA 20. RESUMEN DEL PASO 2.

ASPECTOS AMBIENTALES	CALIFICACIÓN
Longitud del cauce con caudales drásticamente reducidos	
Calidad de agua del río (Índice de calidad IFSN)	
Requerimiento de agua para dilución de carga contaminante que ingresa en el sector afectado	
Índice de integridad biótica de peces	
Especies acuáticas amenazadas, que migran o se encuentran en peligro de extinción	
Calidad biológica del agua (Índice de calidad BMWP/Col)	
Índice biótico de vegetación riparia	
Diversidad del perifiton	
Modificación del paisaje	
Usos del agua en los trayectos afectados	
TOTAL	

PASO 3. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DE GARANTÍA AMBIENTAL.

Durante el desarrollo del paso uno (1) se obtuvo la serie de caudales naturales del río afectado en el sitio de presa. Para este sitio se determinó el Q95% para cada mes del año, información con la cual se elaboró la curva de del Q95% anual del sitio de inicio de la futura perturbación.

La curva de caudal mensual de garantía ambiental resulta de la obtención de valores en m³/s, definidos a partir de la curva anual obtenida para el Q95% en el sitio de ubicación de la presa o desviación de caudales, a los cuales se les aplica el porcentaje obtenido dentro de la calificación ambiental realizada en el paso dos (2). (Ver Tabla 21).

TABLA 21. OBTENCIÓN DEL CAUDAL DE GARANTÍA AMBIENTAL

CAUDALES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Q95%												
Paso 2.	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
CGA												

El caudal de garantía ambiental (CGA) obtenido en la tabla anterior, será la referencia para la programación de caudales que deberán transitar por el cauce alterado (entre la presa y la descarga de la casa de máquinas) durante la operación del proyecto.

PASO 4. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO FUTURO DEL CAUCE ALTERADO.

El paso siguiente define cuanto caudal de la curva del caudal de garantía ambiental (CGA) será proporcionado por el proyecto. Debido a que el CGA en su totalidad debe ser suministrado desde la presa misma para cubrir los requerimientos mínimos del sector afectado, debe considerarse que aportes de caudales como los vertimientos (principalmente en proyectos a filo de agua) y las filtraciones de la presa, también harán parte del caudal que transitará por el cauce con caudales reducidos. Esta evaluación es importante porque de no hacerse, puede implicar entre otras, sustanciales reducciones de la energía generada y de la capacidad instalada del proyecto y por ende de la viabilidad económica del mismo. Por ello, y sin detrimento del recurso ambiental disponible, se ha integrado a los componentes del caudal de garantía ambiental otros caudales que con seguridad también ingresarán a dicha zona, los cuales además de reducir la afectación sobre la viabilidad económica del proyecto, contribuirán al mantenimiento de las condiciones físicas, biológicas y sociales del trayecto de río afectado.

Así, el caudal de garantía ambiental estará conformado por las aguas provenientes de:

1. Las aguas de los afluentes que ingresan al sector comprendido entre el sitio de presa y el límite definido como cauce drásticamente alterado.
2. Los derrames o reboses que presentará el vertedero durante la operación del proyecto.
3. Las infiltraciones que toda presa presenta durante la operación del proyecto.
4. El caudal que se identifique mediante la aplicación de esta metodología y que deberá adicionarse por parte del proyecto.

Este último numeral (4), será el resultado de restarle al caudal de garantía ambiental identificado en el Paso 3, el caudal que se obtenga en los numerales 1, 2 y 3, el cual es llamado también caudal de recuperación. (Ver Tabla 22)

TABLA 22. DETERMINACIÓN DE CAUDALES A SUMINISTRAR POR EL PROYECTO.

CAUDALES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
CGA												
Vertimientos												
Infiltraciones												
PROYECTO												

Nota: Al CGA se le restan los caudales determinados para los vertimientos y las filtraciones de la presa, para obtener como resultado, los caudales que el proyecto debe programar para completar el requerimiento ambiental del tramo.

Finalmente, con los resultados obtenidos, se grafica la acumulación de caudales entre el sitio de presa y la descarga de caudales turbinados que realizará el proyecto, agregando a esta gráfica, según el abcisado, los aportes de los afluentes al cauce alterado. Los aportes de los afluentes corresponden a los calculados en el numeral 4.2.1. Longitud del Río con drástica reducción de caudal.

EN RESUMEN:

En el Paso 1, se determinó con caudales naturales el caudal correspondiente al Q95% de la corriente, en el sitio de inicio de la alteración para cada mes del año.

En el Paso 2 se realizó la calificación ambiental multivariable del sector comprendido entre el sitio de presa o desviación y la descarga proveniente de la casa de máquinas con el objeto de revisar la calidad ambiental del sector.

En el Paso 3, con base en la calificación ambiental realizada en el paso anterior, se determinó el Caudal de Garantía Ambiental (CGA), que es aquel que deberá transitar por el sector de cauce que sufrirá la reducción una vez se construya el proyecto, con el fin de preservar las manifestaciones ambientales de importancia.

Y, en el Paso 4, se determinó el caudal de recuperación del sector que sufrirá la reducción durante la operación del proyecto, considerando para ello, tanto el caudal suministrado por los afluentes que ingresan en el sector, como el proveniente del proyecto por infiltración de la presa y reboses.

4. BIBLIOGRAFÍA

- Allan, J. (1995). Stream ecology. En J. ALLAN, *Stream ecology*. Great Britain: Alden Press.
- Allan, J. D. (1959). *Stream Ecology. Structure and funcion of running waters*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Angel, E. (1993). *Sistema SUPER/OLADE - BID. Módulo Ambiental, manual de referencia*. Bogotá D. C.
- Bodie, J. y. (2000). Spatial and temporal use of foodplain habitat by lentic. *Oecologia*, 122: 138-146.
- Camacho, L. A. (2008). *METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL EN*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Empresas, P. d. (1994). *Boletín hidrometeorológico. División Medio Ambiente. Departamento de Hidrometría e Instrumentación*. pp.69 - 70. Medellín, Colombia: EPM.
- Estes, C. y. (1986). *Review and analysis of methods for quantifying instream flow requirements. Estados unidos, Vol. 22, No. 3 (junio 1986)*. pp. 389 -398. Estados Unidos: Water Resource Bulletin.
- Fraser, J. C. (1972). *River ecology an man. New York*. pp. 263 - 283. New York: Ed. por Ray Oglesby, Carlson y Mc.Cann.
- Grecco, G. A. (2005). Metodología para la Determinación de los Caudales de Garantía Ambiental. *Empresas Públicas de Medellín*, 15(3): 153-173.
- Gregory, S. B. (2003). The ecology and management of wood in. *American Fisheries Society*.
- Karr, R. J. (1981). Assessment of biotic Integrity using fish communities. *Fisheries*, 6(6):21-27.
- Margalef, R. (1978). *Perspectivas de la teoría ecológica*. 109 p. Barcelona, España: De Blume.
- Milhous, R. (1992). *Is an instream flow need a benefical use water resources planning an management. Proceeding of the water resources session al water forumm' 92. ASCE*. pp. 368-373. EE. UU.: Ed. Mohammad Karamouz.
- Ministerio, d. O. (1989). *Guías metodológicas para la elaboración de estudios de impacto ambiental. 2: grandes Presas. Madrid. Centro de publicaciones*. pp 199. Madrid, España: Secretaría General técnica.

- Quinn, J. W. (1992). Effects of riparian grazing and channelisation on stream in Southland, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 26: 259-269.
- R. Cuiat, a. P. (1981). *Environnement et petites usines hydroelectriques*. . No. 4/5. pp. 243-247. París, Francia: La hoville blanche.
- Roldán, P. (1988). *Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia*. p 217. Bogotá D. C.: FEM.
- Roldán, P. (1992). *Fundamentos de Limnología Neotropical*. Universidad de Antioquia. p. 529. Medellín, Colombia: UdeA.
- Stalnaker, C. B. (1979). *The use of habitat structure preferenda for establishing flow regimes necessary for maintenance of fish habitat. The ecology of regulated streams*. Stanford. New York. pp. 321-337. New York: Ed. J. Ward y J.A.
- Stevenson, J. R. (1996). Algal ecology. Freshwater benthic. En J. R. Stevenson, *Algal ecology. Freshwater benthic*. San Diego: Academic Press.
- Trujillo, C. (1995). *Aproximación teórica al estudio de los criterios y metodologías para la determinación de un caudal ecológico*. Borrador de tesis de grado. EE.PP.M. UPRN. Medellín. Medellín, Colombia: EPM.
- Velázquez, V. E. (2004). Los peces como indicadores del estado de salud de los ecosistemas acuáticos. *CONABIO Biodiversitas*, 57: 12-15.
- Waddle, T. (1990). Application of a water budget for instream flows. Optimizing the resources for water mangement. Proceedin of the 17th. annual national conference. EE.UU. . *Optimizing the resources for water mangement*, (págs. pp. 788 - 793.). EE. UU.
- Wetzel, R. (2001). Limnology. Lake and river. En R. Wetzel, *Limnology. Lake and river*. Academic Press.



energía | gas natural | aguas

www.epm.com.co

EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN - E.S.P.
ÁREA PLANEACIÓN GENERACIÓN ENERGÍA

Metodología para el cálculo de los caudales de garantía ambiental

VERSIÓN 00

ANEXO 1. RESUMEN DE LA CALIFICACIÓN AMBIENTAL

Resumen de la Calificación Ambiental

ASPECTOS AMBIENTALES	METODOLOGÍA	DESCRIPTOR	RANGO		PONDERADOR	RÍO
Longitud del cauce con caudales drásticamente reducidos	Medición cartográfica hasta alcanzar el punto en donde el proyecto retorne las aguas usadas en generación o hasta donde se alcance por regionalización el 50 % del Q95% medido en el inicio de la perturbación.	km	< 615		0	0
			1229	1844	1	
			1844	2458	2	
			2458	3073	3	
			3073	3687	4	
			3687	4302	5	
			4302	4916	6	
			4916	5531	7	
			5531	6145	8	
			6145	6760	9	
		>6760		10		
Calidad de agua del río	Índice de calidad IFSN	Excelente	91	100	10	0
			86	90	9	
		Buena	76	80	8	
			71	75	7	
			66	70	6	
		Regular	61	65	5	
			56	60	4	
			51	55	3	
			26	50	2	
		Mala	0	25	1	
Pésima	0	25	1			
Requerimiento de agua para dilución de carga contaminante que ingresa en el sector afectado	Determinación de la demanda química de oxígeno DQO	mg/l	0	3	0	0
			3	6	1	
			6	9	2	
			9	12	3	
			12	15	4	
			15	18	5	
			18	21	6	
			21	24	7	
			24	27	8	
			27	30	9	
		>30		10		
Índice de Integridad biótica de peces	El índice de integridad biótica es la suma de los puntajes de cada variable, dividida por el número de variables. El índice total fluctúa entre 0,2 y 1	0 - 0,3	Baja integridad biótica de los peces	0,00		0
				0,01	0,10	1
				0,11	0,20	2
		0,31 - 0,6	Moderada integridad de los peces	0,21	0,30	3
				0,31	0,40	4
				0,41	0,50	5
		0,51	0,60	6		

ASPECTOS AMBIENTALES	METODOLOGÍA	DESCRIPTOR		RANGO		PONDERADOR	RÍO
		0,61 – 1	Alta integridad biótica de los peces	0,61	0,70	7	
				0,71	0,80	8	
				0,81	0,90	9	
				> 0.9		10	
Especies acuáticas que realizan migraciones, son endémicas, amenazadas o se encuentran en peligro de extinción	Especies con amplia distribución						0
	Especies amenazadas o en peligro de extinción						
Calidad biológica del agua	Valor del índice BMWP' Col	Muy crítica	<16		0		0
		Crítica	16	35	1		
		Dudosa	36	60	2		
		Aceptable	61	70	3		
			71	80	4		
			81	90	5		
			91	100	6		
		Buena	101	110	7		
			111	120	8		
		Muy buena	121	130	9		
>130			10				
ÍNDICE BIÓTICO DE VEGETACIÓN RIPARIA	El índice oscila entre 0 y 1; cero para los sitios donde la variable demuestra deterioro y uno para sitio sin alteración	Estado ecológico deficiente o malo para esta comunidad	< 0.01		0		0
			0,01	0,10	1		
			0,11	0,20	2		
			0,21	0,30	3		
		Estado ecológico moderado para esta comunidad	0,31	0,40	4		
			0,41	0,50	5		
			0,51	0,60	6		
		Estado ecológico bueno o excelente para esta comunidad	0,61	0,70	7		
			0,71	0,80	8		
			0,81	0,90	9		
> 0.9			10				
Calidad del agua por Diversidad del Perifiton según índice de SHANNON - WIENER	El índice es atractivo por su fácil aplicación y su independencia del tamaño de la muestra, arrojando valores que van desde 0 hasta 5, donde 5 es la máxima diversidad	Aguas muy contaminadas	0,00	0,30	1		0
			0,30	0,60	2		
			0,60	0,90	3		
		Aguas medianamente contaminadas	0,90	1,20	4		
			1,20	1,50	5		
			1,50	1,80	6		
			1,80	2,10	7		
			2,10	2,40	8		
			2,40	2,70	9		
		Aguas muy limpias	> 2.7		10		
Modificación del paisaje	Cuenca visual (Sumatoria de	Ausente		< 1		0	
		Para el caso de	1	1000	1		

ASPECTOS AMBIENTALES	METODOLOGÍA	DESCRIPTOR	RANGO		PONDERADOR	RÍO
	longitudes en metros del cauce con caudales reducidos que se observa desde los diferentes puntos de la cuenca, principalmente desde la infraestructura existente en la zona, viviendas, vías, etc.)	presentarse escenarios naturales únicos o especiales, se le asignará automáticamente la máxima calificación destinada a este parámetro	1000	2000	2	
			2000	3000	3	
			3000	4000	4	
			4000	5000	5	
			5000	6000	6	
			6000	7000	7	
			7000	8000	8	
			8000	9000	9	
			> 9000		10	
Usos del agua en el trayecto con caudales reducidos	Porcentaje de caudal concesionado o proyectado para uso futuro, en relación con el Q95% promedio anual determinado para el sitio de inicio de la perturbación. (El caudal del usos además de lo anterior, se suma en su totalidad al caudal ambiental)	Ausente	0,000		0	0
		Presente	0,000	0,001	1	
			0,001	0,002	2	
			0,002	0,003	3	
			0,003	0,004	4	
			0,004	0,005	5	
			0,005	0,006	6	
			0,006	0,007	7	
			0,007	0,008	8	
			0,008	0,009	9	
> 0,009		10				
TOTAL (%)						0.00

ANEXO 2. PUNTUACIONES ASIGNADAS A LAS DIFERENTES FAMILIAS DE MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS PARA LA OBTENCIÓN DEL BMWP'/CoI

Puntuaciones asignadas a las diferentes familias de macroinvertebrados acuáticos para la obtención del BMWP'

FAMILIAS	PUNTUACIÓN
Siphonuridae, Heptageniidae, Leptophlebiidae, Pothamantidae, Ephemeridae, Taeniopterygidae, Leuctridae, Capniidae, Perlodidae, Perlidae, Chloroperlidae, Aphelochridae	10
Phryganeidae, Molannidae, Beraeidae, Odontoceridae, Leptoceridae, Goeridae, Lepidostomatidae, Brachycentridae, Sericostomatidae, Athericidae, Blepharecidae	
Astacidae	
Lestidae, Calopterygidae, Gomphidae, Cordulegasteridae, Aeshnidae	8
Cordulidae, Libellulidae	
Psychomyiidae, Glossosomatidae	
Ephemeriidae, Prosopistomatidae	
Nemouridae	7
Rhyacophilidae, Polycentropodidae, Limnephilidae, Ecnomidae	
Neritidae, Viviparidae, Ancylidae, Thiaridae	
Hydroptilidae	
Unionidae	6
Corophiidae, Gammaridae, Atyidae	
Platycnemididae, Coenagrionidae	
Oligoneuriidae, Polymitarcidae	
Dryopidae, Elmidae, Helophoridae, Hydrochidae, Hydraenidae, Clambidae	
Hydropsychidae	5
Tipulidae, Simuliidae	
Planariidae, Dendrocoelidae, Dugesiidae	
Baetidae, Caenidae	
Haliplidae, Curculionidae, Chrysomelidae	
Tabanidae, Stratiomyidae, Empididae, Dolichopodidae, Dixidae	
Ceratopogonidae, Anthomyidae, Limoniidae, Psychodidae, Sciomyzidae	4
Rhagionidae	
Sialidae	
Piscicolidae	
Hidracarina	
Mesoveliidae, Hydrometridae, Gerridae, Nepidae, Naucoridae, Pleidae Veliidae	
Notonectidae, Corixidae	
Helodidae, Hydrophilidae, Hygrobiidae, Dytiscidae, Gyrinidae	
Valvatidae, Hydrobiidae, Lymnaeidae, Physidae, Planorbidae	3
Bithyniidae, Bythinellidae, Sphaeridae	
Glossiphoniidae, Hirudidae, Erpobdellidae	
Ostracoda	
Chironomidae, Culicidae, Ephydriidae, Thaumaleidae	
Oligochaeta (todas las clases), Syrphidae	2